



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**industriales**  
etsii UPCT

# Montaje y ensayo de la producción de hielo líquido en un intercambiador de calor de placas con superficie rascada de forma rotativa

Titulación: Ingeniero Industrial  
Intensificación: -  
Alumno: Juan Manuel Durán Plazas  
Directores: Juan Pedro Solano Fdez

Cartagena, 1 de Mayo de 2013

## **Indice**

1.	Introducción y objetivos.....	4
1.1.	Técnicas basadas en el empleo de sistemas rascadores .....	4
1.2.	Aplicaciones del hielo líquido .....	8
1.3.	Ventajas del hielo líquido .....	9
2.	Instalación experimental.....	12
2.1.	Circuito de refrigeración primario .....	12
2.2.	Circuito de enfriamiento secundario.....	14
2.3.	Intercambiador de calor de placas .....	23
3.	Instrumentación.....	35
3.1.	Caudal de la disolución de cloruro cálcico .....	35
3.2.	Temperatura de la disolución de cloruro cálcico .....	35
3.3.	Temperatura de la disolución de cloruro sódico.....	35
3.4.	Temperatura en la pared del intercambiador de placas .....	36
3.5.	Medidor de la potencia activa consumida por el motor .....	36
3.6.	Velocidad de giro del rascador.....	36
3.7.	Temperatura del refrigerante.....	37
3.8.	Temperatura ambiente, temperatura en la reductora y temperatura en el aislante del rascador .....	37
3.9.	Presión del refrigerante .....	37
3.10.	Adquisición de datos .....	38
4.	Resultados .....	40
5.	Conclusiones.....	76
6.	Bibliografía .....	78
	Anexo 1: Manipulación y seguridad de las disoluciones .....	79
	Anexo 2: Manipulación y seguridad del refrigerante.....	81
	Anexo 3: Hoja de características de la unidad condensadora.....	82
	Anexo 4: Hoja de características del intercambiador de placas .....	85
	Anexo 5: Hoja técnica de los sensores PT100 .....	87
	Anexo 6: Hoja de características técnicas de los sensores RTD .....	88
	Anexo 7: Hoja de características técnicas de los sensores de presión .....	89
	Anexo 8: Calibración de los termopares.....	94

Anexo 9: Ensayos de generación de hielo líquido.....	104
9.1. Ensayo 1A.....	104
9.2. Ensayo 1B.....	107
9.3. Ensayo 1C.....	110
9.4. Ensayo 1D.....	113
9.5. Ensayo 1E.....	116
9.6. Ensayo 2A.....	119
9.7. Ensayo 2B.....	122
9.8. Ensayo 2C.....	125
9.9. Ensayo 2D.....	128
9.10. Ensayo 2E.....	131
9.11. Ensayo 3A.....	134
9.12. Ensayo 3B.....	137
9.13. Ensayo 3C .....	140
9.14. Ensayo 3D .....	143
9.15. Ensayo 3E.....	146

## **1. Introducción y objetivos**

El hielo líquido se puede definir como una mezcla de cristales de hielo y una solución acuosa. Esta solución se compone de agua con uno o más solutos que provoquen la depresión del punto de congelación, para permitir el descenso de temperatura a rangos negativos y por consiguiente la coexistencia de una fase sólida y otra líquida. Debido a estas características, el fluido se puede transportar, bombear, transportar por tuberías y almacenar en tanques.

Sin embargo, para generar hielo líquido no es suficiente con bajar la temperatura de la disolución por debajo de su punto de congelación; es además necesario que la formación de hielo se produzca en forma de pequeños cristales que puedan quedar suspendidos dentro de la disolución. Existe en la actualidad una gran variedad de técnicas de generación de hielo líquido que, basándose en principios físicos distintos, son capaces de evitar que el hielo crezca en forma de grandes bloques. La mayoría de estas técnicas están todavía en fase experimental, siendo las técnicas basadas en el empleo de sistemas rascadores las únicas que han alcanzado hasta la fecha un cierto nivel de implantación industrial.

Los objetivos principales de este proyecto fin de carrera son: completar el diseño de la instalación experimental de generación de hielo líquido en intercambiador de calor de placas en superficie rascada rotativo, su montaje y puesta en marcha, y el estudio de la producción de hielo líquido en dicha instalación.

### **1.1. Técnicas basadas en el empleo de sistemas rascadores**

Como se ha citado anteriormente, hasta la fecha han sido los sistemas de rascador los que claramente han alcanzado un mayor nivel de implantación industrial.



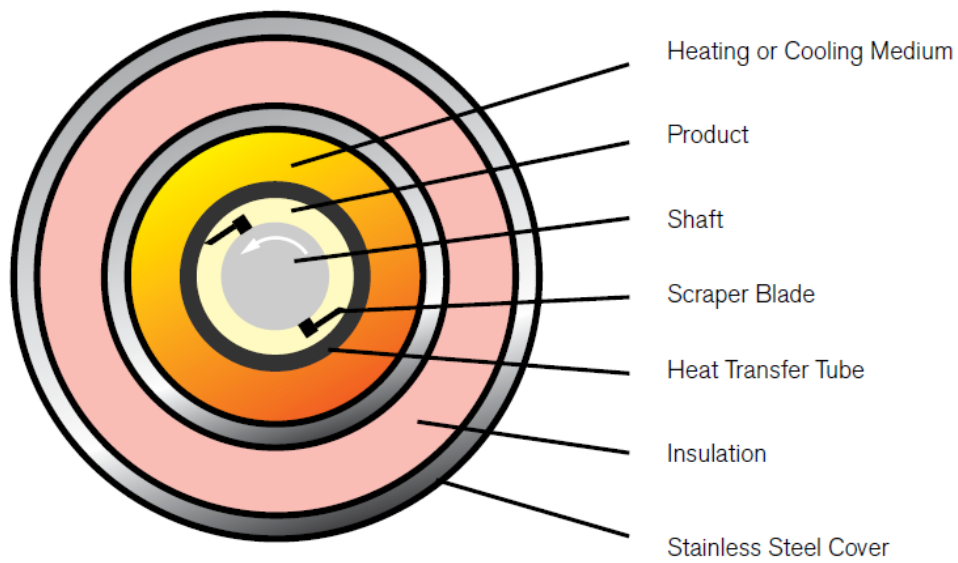
Estos sistemas están constituidos por una instalación frigorífica convencional, cuyo evaporador actúa como generador de hielo líquido. Durante el proceso de enfriamiento se generan cristales de hielo sobre una de las superficies del evaporador.

Esta formación de cristales supone la aparición de una capa de hielo que actúa como aislante térmico, disminuyendo la eficacia del proceso, por lo que es necesario retirar los cristales según se van formando. De ello se encarga el mecanismo rascador, que desprende los cristales de hielo de la pared y los introduce en el seno del fluido, obteniendo esta forma un caudal de hielo líquido a la salida del evaporador.

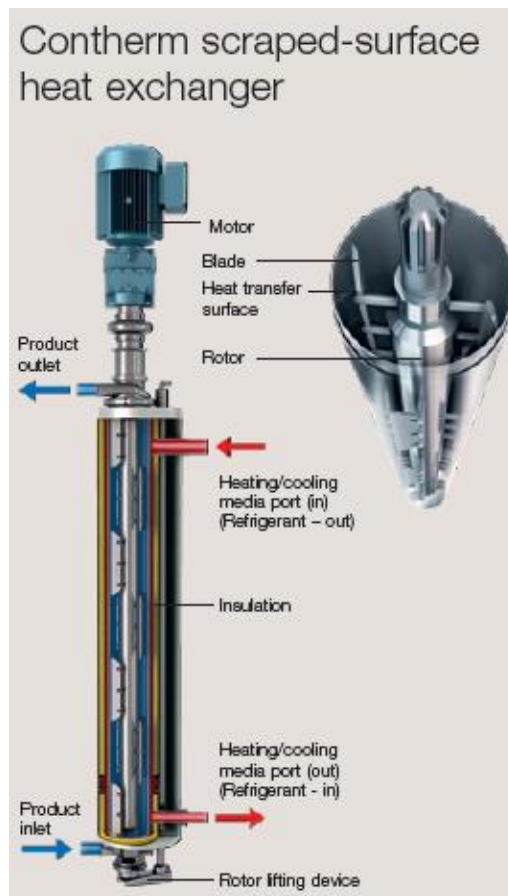
La retirada de los cristales de hielo de las paredes del evaporador puede conseguirse de tres formas distintas, según sea la disposición de las cuchillas, y el movimiento del vástago, rotatorio o de vaivén.

### **Sistemas tubulares rotativos**

El vástago se instala paralelo al eje del tubo, no necesariamente coincidente con él, y gira a distintas frecuencias, desde pocas rpm a más de 1000 rpm. El número de cuchillas oscila entre 1 y 4 y puede aprovechar el efecto de las fuerzas centrífugas para rascar la superficie interna del tubo. Como ejemplos tenemos el Votator II de Waukesha Cherry-Burrell y el Contherm de Alfa-Laval.



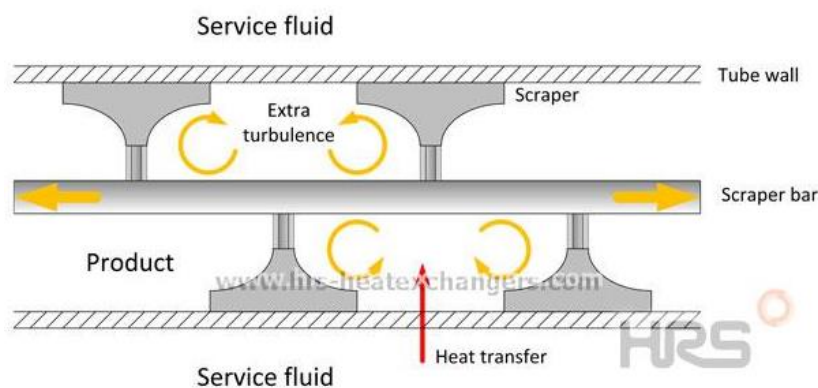
*Figura 1: Votator II de Waukesha Cherry-Burrell*



*Figura 2: Contherm de Alfa-Laval*

## Sistemas tubulares alternativos

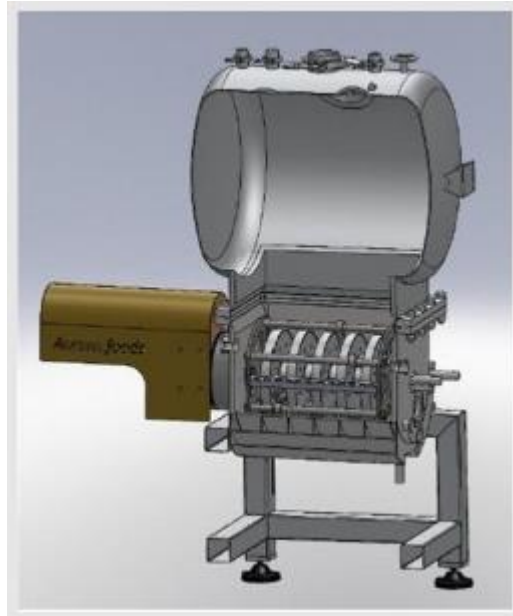
El vástago se instala concéntrico con el tubo y se mueve longitudinalmente sin girar. La frecuencia se encuentra entre 10 y 60 ciclos por minuto. Las cuchillas pueden variar en número y forma, desde disposiciones similares a un deflector a configuraciones de disco perforado. Un ejemplo es el Unicus de HRS Heat Exchangers.



*Figura 3: Unicus de HRS Heat Exchangers*

## Sistemas de placas rotativas

Las cuchillas frotan la superficie externa de unas placas circulares dispuestas en serie dentro de la carcasa. El fluido que calienta o enfría corre dentro de las placas. La frecuencia es de algunas decenas de rpm. Un ejemplo es el T-Sensation de HRS Spiratube.



*Figura 4: T-Sensation de HRS Spiratube*

## **1.2. Aplicaciones del hielo líquido**

Tiene por objeto satisfacer los requerimientos de hielo de la industria Agroalimentaria, Frutihortícola y Pesquera, dado que el hielo líquido puede generarse con agua potable variando el punto de congelación de la misma o con agua de mar.

En el caso de la industria pesquera, el uso de agua de mar permite conservar las características del hábitat del pescado. Además, al comportarse como un líquido permite cubrir y congelar de forma instantánea los alimentos en toda su superficie, eliminando la posibilidad de formación de bolsas de aire. Con ello se logra proteger a los alimentos de los ataques de las bacterias impidiendo la putrefacción de los mismos.

En industria frutihortícola, el uso de agua potable en solución azucarada o en solución salina permite la conservación de frutas y verduras, manteniendo las mismas sus características de sabor, color y aromas propios sin necesidad de tratamientos previos a la misma.

En industria agroalimentaria, el uso de agua potable en solución salina puede ser utilizado en los frigoríficos para faena de vacunos, pollos, conejos, etc.

### **1.3. Ventajas del hielo líquido**

En función de las aplicaciones expuestas del hielo líquido se derivan una gran variedad de ventajas asociadas a las mismas.

#### **Incremento de la productividad**

Al comportarse como un líquido se puede bombear, haciendo fácil su manipulación, distribución y reparto en los puntos de descarga para su uso. No requiere trabajo manual para ser trasladado, lo que disminuye los costos asociados con el mantenimiento de los equipos y personal.

#### **Enfriamiento rápido**

A través de los microcristales de hielo, el hielo líquido suministra protección instantánea a los productos comestibles perecederos, manteniéndolos frescos y preservando su color por periodos de tiempo prolongados. La velocidad de este proceso permite obtener una calidad del producto superior.

#### **Reducción del consumo de energía**

Los bloques y escamas de hielo son producidos en los puertos, por lo que se necesita energía para mantenerlo frío a bordo. Sin embargo, el hielo líquido es producido a bordo en el momento de ser utilizado (producido y rociado en el momento que los peces son capturados).

## **Medio ambiente higiénico**

El hielo líquido es producido, distribuido y almacenado en un ambiente totalmente cerrado. Solo toma contacto con el medio externo cuando llega al punto de descarga, eliminándose el riesgo de contaminación del hielo al tomar contacto con productos contaminados.

## **Producción**

Hace ya algunos años, distintas instituciones como universidades e institutos tecnológicos y empresas privadas, han estudiado la forma de optimizar la conservación de los productos de mar tras la captura. Esto llevó a numerosas publicaciones de resultados ante análisis comparativos entre el conocido sistema de refrigeración por hielo en escamas y el novedoso de hielo líquido, que determinaron numerosas ventajas en la utilización de este último. Se hicieron pruebas de evaluación de la calidad bioquímica, fisicoquímica y microbiológica de distintas especies marinas tras haberlas conservado paralelamente en ambos sistemas. Los estudios arrojaron datos alentadores cuando se descubrió que el crecimiento microbiano de las piezas conservadas en hielo líquido era notablemente menor que en el sistema de hielo en escamas tradicional. También disminuyeron los niveles de coliformes, microorganismos proteolíticos, el pH y otros parámetros que conducían a la ratificación de las ventajas del hielo líquido.

Cuando se utiliza hielo líquido, se aumenta el tiempo de conservación y se logra un mayor aprovechamiento de los productos marinos en los posteriores procesos ya sea de fileteado, congelado, enlatado, o la cocción. El por qué de todo esto tiene que ver con la técnica misma y propiedades de este método. Como se sabe, una vez que el producto de la pesca se extrae de su entorno, comienza una degradación de alta velocidad que le transfiere la característica de “altamente perecedero”. El hielo líquido puede ser aplicado inmediatamente. A diferencia del hielo en escamas, se produce un efecto sanitario de lavado. El nuevo entorno de la pieza capturada es muy similar al mismo donde se encontraba antes de la captura, incluso con el mismo

porcentaje de cloruro de sodio. Luego, el pez muere en forma instantánea y no lentamente por asfixia como en el caso anterior. El nuevo entorno similar al hábitat marino, ayuda a mantener los valores de humedad del pescado, y la forma micro-esférica del hielo no daña a la pieza. A esto se le suma la capacidad del hielo líquido para cubrir totalmente la superficie de la pieza sin dar lugar a que se formen intersticios de aire (que es uno de los principales agentes que permiten la degradación). Al aumentar entonces la superficie de contacto con la pieza, mejora notablemente la conductividad térmica. De esta manera, se logran controlar aún más, los mecanismos de degradación.

## 2. Instalación experimental

Partimos de una instalación donde ya vienen definidos gran parte de los elementos que van a formar parte del proceso de generación de hielo líquido, por lo que vamos a proceder a presentar cada uno de ellos. El esquema de la instalación es el siguiente:

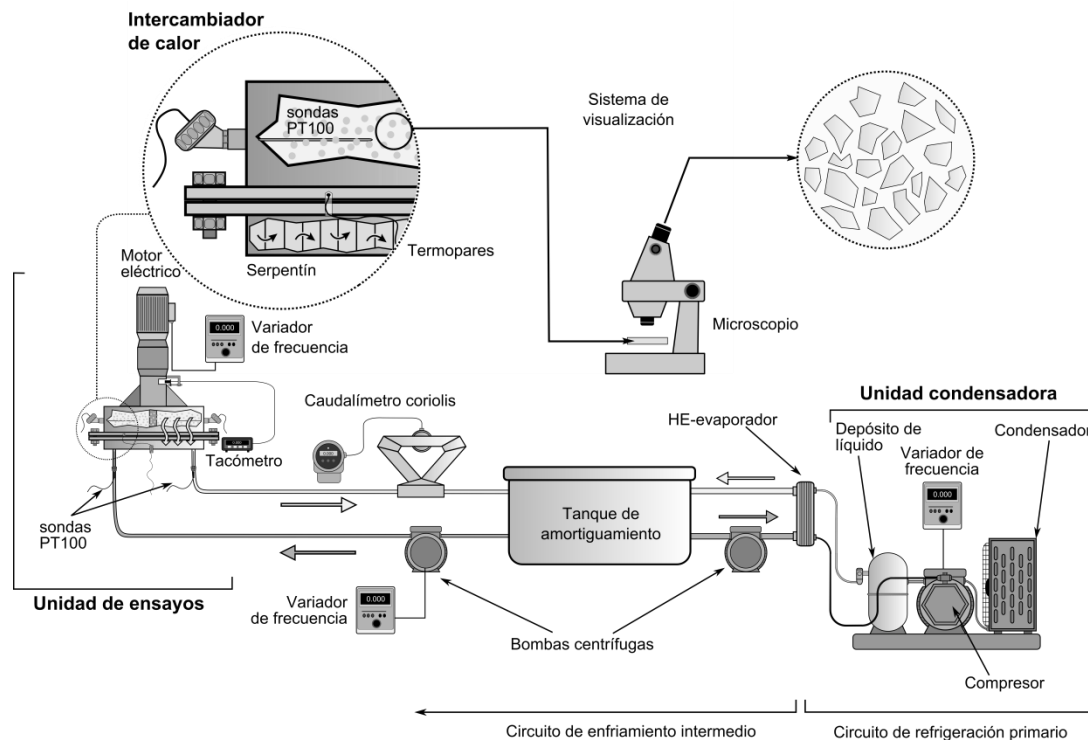


Figura 5: Esquema de la instalación de producción de hielo líquido

### 2.1. Circuito de refrigeración primario

El circuito de refrigeración primario abarca desde la unidad condensadora hasta el evaporador. El refrigerante que circula por dicho circuito es el R507, el cual enfriará por medio del evaporador a la disolución de cloruro cálcico (se nombrará a dicha disolución como cloruro cálcico, sin olvidar que es una disolución), fluido que circulará por el circuito de enfriamiento intermedio.



La unidad condensadora está compuesta por compresor, con su correspondiente variador de frecuencia, depósito de líquido y condensador, además del presostato. El variador de frecuencia, comandado por un PID, tiene la función de reducir o aumentar el régimen de funcionamiento del compresor para poder mantener constante la temperatura del depósito que contiene cloruro cálcico.



*Figura 6: Unidad condensadora y presostato*

Otro elemento muy importante del circuito es la electroválvula, situada a la salida de la unidad condensadora. Previo al paro del compresor, se cierra la electroválvula, de forma que el líquido no puede salir del depósito mientras que el compresor sigue vaciando la instalación de refrigerante. Cuando el presostato llega a la presión de consigna (baja) cierra el contactor y el compresor se para.

En esta parte del circuito se van a medir distintas variables únicamente para el control del proceso, y que no tienen relevancia en los resultados

experimentales. Estos parámetros a medir van a ser presión y temperatura. Los puntos donde interesa conocer temperatura son a la entrada y salida del evaporador. Para ello se instalaren sondas de temperatura PT100. Además de la entrada y salida al evaporador se medirá también la temperatura a la salida del calderín, donde se tiene la certeza de que el refrigerante se encuentra en estado líquido. Los puntos donde se va a medir la presión serán, además de entrada y salida del evaporador (presión de baja), en la salida del depósito de líquido (presión de alta). Para entrada y salida se emplean sensores de presión absoluta, mientras que a la salida del depósito se emplea un sensor de presión diferencial con un extremo abierto a la atmósfera.

## **2.2. Circuito de enfriamiento secundario**

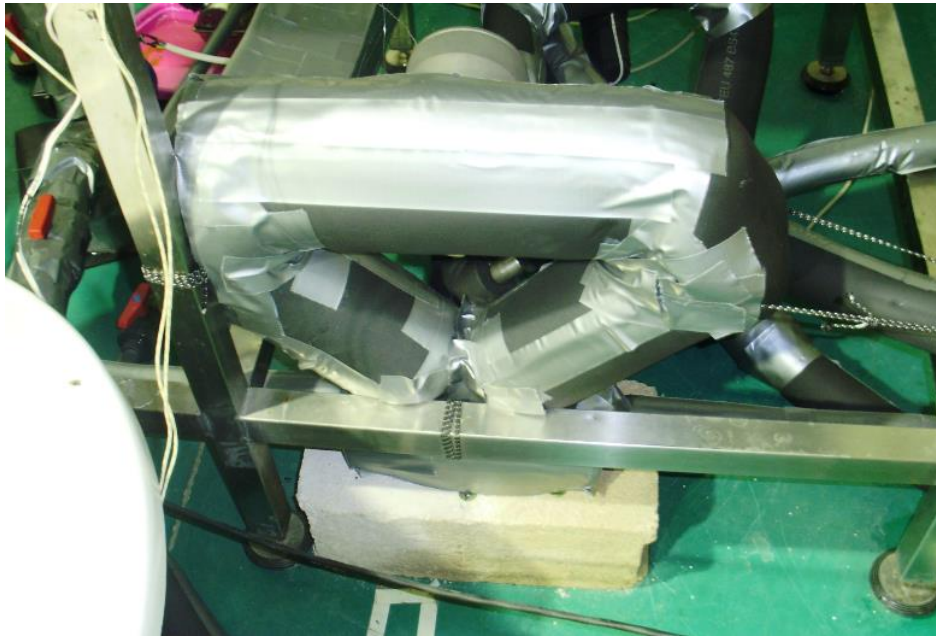
Por este circuito va a circular una disolución de cloruro cálcico en agua al 25%. Es el fluido encargado de enfriar el intercambiador de placas, donde se producirá el hielo líquido a partir de una disolución de cloruro sódico (también se hará referencia a dicha disolución como cloruro sódico). Se procede a la descripción de los elementos que van a estar involucrados en este circuito.

### **Bombas centrifugas**

En total se van a emplear tres bombas. La primera impulsará la disolución de cloruro cálcico desde el depósito que lo contiene hasta el evaporador donde será enfriado por el refrigerante R507. La segunda bomba lo hará circular por el intercambiador de placas para la producción de hielo. La tercera bomba se empleará para cargar y descargar la salmuera o el hielo líquido del intercambiador.

### **Caudalímetro Coriolis**

Colocado a la salida del intercambiador de placas. Es necesario para el cálculo de la transferencia de calor, ya que hay que determinar el caudal de disolución de cloruro cálcico que se está haciendo circular.



*Figura 7: Caudalímetro Coriolis*

### **Tanque de amortiguamiento**

Se ha instalado un depósito de 300 litros de capacidad de almacenamiento, aislado del exterior para conservar la capacidad frigorífica que posee el cloruro cálcico tras ser enfriado por el R507.

Este depósito cuenta con varios orificios. Dos entradas y dos salidas en los laterales para que haya una recirculación por todo el circuito. Un tercer orificio de salida en la parte inferior para su vaciado y limpieza, y un último orificio en otra cara lateral donde se ubica una sonda de temperatura (PT100). Dicha sonda proporciona la lectura de la temperatura en el tanque y será empleada por el PID para controlar, a través del variador de frecuencia, el régimen de giro del compresor y mantener la temperatura constante.



*Figura 8: Tanque de amortiguamiento*

Además de esto, se han introducido, en los tramos de tubería de entrada al tanque y en el de salida del lado del evaporador, cuatro resistencias de 400W cada una para calentar la disolución, ya que en según que situaciones el compresor puede tener una potencia frigorífica excesiva y enfriar muy por encima de las condiciones a las cuales se pretende que el fluido entre en el intercambiador de placas.



*Figura 9: Resistencias introducidas en los tramos de tubería*

En este circuito se van a medir las temperaturas de salida y de entrada del cloruro cálcico en el evaporador por medio de dos termopares tipo T. Estos valores tampoco van a tener importancia en los ensayos, pero si tienen carácter informativos.

#### - Cálculo del espesor del aislante del tanque

Para el cálculo del espesor del aislante se van a aplicar conceptos de transmisión del calor. El calor se va a transmitir por conducción a través del material del que está compuesto el tanque y el propio aislante, y por convección natural desde la superficie del aislante al aire que lo rodea.

El proceso de transmisión de calor por conducción tiene lugar debido al salto de temperatura existente entre la superficie interior en contacto con el fluido (a 12<sup>0</sup>C), y la superficie exterior en contacto con el aire (a temperatura ambiente, 17<sup>0</sup>C).

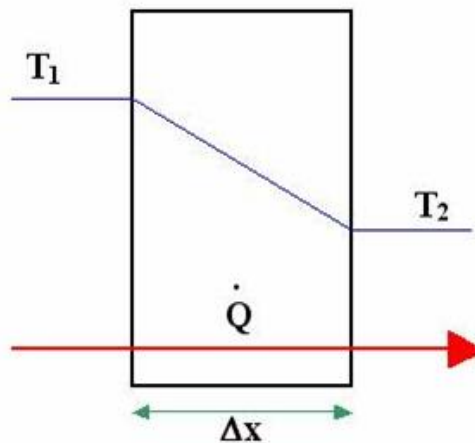


Figura 10: Transmisión de calor por conducción

El flujo de calor  $\dot{Q}$  es

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} = kA \frac{T_1 - T_2}{e}$$

donde  $dT$  es la diferencia de temperatura entre la temperatura  $T_2$ , temperatura de la pared en contacto con el fluido supuesta igual a la temperatura del fluido en el interior del tanque a efectos de cálculo, y  $T_1$ , temperatura del aislante en contacto con el aire.  $dx$  es el espesor del aislante,  $e$ , y el espesor de la pared del tanque, que a efectos de cálculo se va a despreciar.  $k$  es la conductividad térmica del aislante (se ha despreciado la pared del tanque), y  $A$  es la superficie por la que se transmite el calor.

El proceso de transferencia de calor por convección natural es debido a la diferencia de temperatura entre la pared del aislante en contacto con el aire, y el propio aire. El flujo de calor  $\dot{Q}$  es

$$\dot{Q} = hA(T - T_{\infty}) = hA(T - T_1)$$

donde  $h$  es el coeficiente de transmisión de calor,  $T$  es la temperatura del aire,  $T_{\infty}$  es la temperatura del aislante en contacto con el aire,  $T_1$ , y  $A$  es la superficie por la que se transmite el calor.

El calor en ambos procesos tiene que ser el mismo,

$$h(T - T_1) = k \frac{T_1 - T_2}{e}$$

teniendo como incógnitas  $h$ ,  $T_1$  y  $e$ .  $h$  se va a determinar por medio del número de Nusselt, el espesor  $e$  se va a particularizar como 3cm, espesor de la plancha, dejando como única variable  $T_1$ , la cual se va a ir variando desde  $T$  hasta  $T_2$ . Como condición de validez del espesor se tiene que dar una temperatura  $T_1$  mayor que la temperatura de rocío para las condiciones del aire ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $HR=70\%$ ).

Para la determinación del número de Nusselt se van a distinguir cuatro casos, dos correspondientes a las paredes laterales, con dimensiones distintas, y otras dos correspondientes a las superficies horizontales, de igual dimensión,

pero una es la superficie del fondo, mientras que la otra es la superficie superior.

### Superficie horizontal inferior

Las expresiones empleadas son las siguientes:

$$Nu = [(Nu_l)^{10} + (Nu_t)^{10}]^{\frac{1}{10}}$$

$$Nu_t = C_t^U Ra^{\frac{1}{3}}$$

$$C_t^U = 0.14 \frac{1 + 0.0107 Pr}{1 + 0.01 Pr}$$

$$Pr = \frac{\mu Cp}{k}$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$$

$$\beta = \frac{1}{T}$$

$$\Delta T = T - T_1$$

$$L = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$$\alpha = \frac{\rho k}{Cp}$$

$$Nu_l = \frac{2.5}{\ln(1 + \frac{2.5}{Nu^T})}$$

$$Nu^T = \frac{0.527}{(1 + (\frac{1.9}{Pr})^{\frac{9}{10}})^{\frac{2}{9}}} Ra^{\frac{1}{5}}$$

donde  $g$ ,  $\mu$ ,  $Cp$ ,  $k$  y  $\rho$  son las propiedades del aire, con los siguientes valores

$g$	9,81	m/s <sup>2</sup>
$\beta$	0,0034112	K <sup>-1</sup>
$\mu$	1,821E-05	Ns/m <sup>2</sup>
$\rho$	1,2122	kg/m <sup>3</sup>
$Cp$	1006,02	J/kgK
$k$	0,0256	W/mK

obtenidos  $\mu$ ,  $C_p$  y  $k$  por medio de las siguientes correlaciones lineales:

$$\mu = -0,98601 + 0,09080125 (T + 273,15) - 1,17635575 \cdot 10^{-4} (T + 273,15)^2 + 1,2349703 \cdot 10^{-7} (T + 273,15)^3 - 5,7971299 \cdot 10^{-11} (T + 273,15)^4$$

$$C_p = 1,03409 - 2,84887 \cdot 10^{-4} (T + 273,15) + 7,816818 \cdot 10^{-7} (T + 273,15)^2 - 4,970786 \cdot 10^{-10} (T + 273,15)^3 + 1,077024 \cdot 10^{-13} (T + 273,15)^4$$

$$k = -2,276501 \cdot 10^{-3} + 1,2598485 \cdot 10^{-4} (T + 273,15) - 1,4815235 \cdot 10^{-7} (T + 273,15)^2 + 1,73550646 \cdot 10^{-10} (T + 273,15)^3 - 1,066657 \cdot 10^{-13} (T + 273,15)^4 + 2,47663035 \cdot 10^{-17} (T + 273,15)^5$$

### Superficie horizontal superior

Para la superficie horizontal superior, solo sufren modificaciones  $Nu_l$  y  $Nu^T$ , y se añade una nueva expresión,  $\bar{C}_l$ .

$$Nu_l = \frac{1.4}{\ln(1 + \frac{1.4}{Nu^T})}$$

$$Nu^T = 0.835 \bar{C}_l Ra^{\frac{1}{4}}$$

$$\bar{C}_l = \frac{0.671}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}$$

### Superficie vertical mayor y superficie vertical menor

La diferencia existente entre una y la otra es el valor de  $L$ . Las expresiones utilizadas son:

$$Nu = [(Nu_l)^6 + (Nu_t)^6]^{\frac{1}{6}}$$

$$Nu_t = \frac{C_t^V Ra^{\frac{1}{3}}}{1 + 1.4 \cdot 10^9 \frac{Pr}{Ra}}$$



$$C_t^V = \frac{0.13 Pr^{0.22}}{(1 + 0.61 Pr^{0.81})^{0.42}}$$

$$Nu_l = \frac{2}{\ln(1 + \frac{2}{Nu^T})}$$

$$Nu^T = \bar{C}_l Ra^{\frac{1}{4}}$$

## Espesor del aislante

Al variar  $T_1$  como se ha dicho anteriormente, obtenemos un espesor de 6cm, por lo que se aislará el tanque con una doble capa de aislante de 3cm de espesor por plancha.

### - Cálculo de la cantidad de cloruro cálcico

Se requiere determinar la cantidad de cloruro cálcico necesaria para disponer en la instalación de una proporción en peso del 25% (masa de soluto entre masa de disolución). Para ello se procede como primer paso al cálculo del volumen total de la instalación por el que va a circular la disolución de cloruro cálcico.

Se van a definir inicialmente las dimensiones de las tuberías, donde los diámetros utilizados han sido los de 25, 32 y 50 mm, y se ha hecho uso de la serie métrica PN 10 para obtener los diámetros interiores.

TUBERIAS	Longitud (cm)	Diámetro (mm)
Tubería salida RASCADOR entrada CORIOLIS	132	45,2
	86	23,0
Tubería salida CORIOLIS entrada TANQUE	53	23,0
	102	27,2
Tubería salida TANQUE entrada BOMBA 2	155	27,2
Tubería salida BOMBA 2 entrada EVAPORADOR	77	27,2
Tubería salida EVAPORADOR entrada TANQUE	226	27,2
Tubería salida TANQUE entrada BOMBA 1	218	27,2
Tubería salida BOMBA 1 entrada RASCADOR	162	45,2

Serie inglesa SDR 26 (11,2 kg/cm <sup>2</sup> )			Serie metrica PN 10		
Diámetro Nominal (pulgadas)	Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Diámetro interior (mm)	Diámetro exterior (mm)	Diámetro Nominal (mm)
½ *	21.3	15.8	17	20	20*
¾ *	26.7	23.5	23	25	25
1	33.4	30.4	27.2	32	32
1 ¼	42.2	38.9	36.2	40	40
1 ½	48.3	43.9	45.2	50	50
2	60.3	55.2	57.0	63	63
2 ½	73.0	66.9	67.8	75	75
3	88.9	81.6	85.7	90	90
4	114.3	105.0	99.4	110	110
6	168.3	154.5	144.5	160	160
8	219.1	201.3	180.8	200	200
10	273.1	240.9	230.8	250	250
12	323.9	285.8	290.8	315	300

De la misma forma, se establecen las dimensiones de los elementos.

ELEMENTOS	Longitud (m)	Diametro (m)	Ancho (m)	Altura (m)
RASCADOR	0,025	0,600		
CORIOLIS	1,350	0,023		
BOMBA 2	0,080	0,080		
BOMBA 1	0,120	0,140		
TANQUE	1,000		0,770	0,170
EVAPORADOR	0,520		0,060	0,055

El volumen total obtenido es de 152 litros. Como el tanto por ciento en peso dado es

$$\% = \frac{\text{masa de soluto en gramos}}{\text{masa de disolución en gramos}} = \frac{\text{masa de soluto}}{\text{masa de soluto} + \text{masa de disolvente}}$$

desarrollando dicha expresión

$$\text{masa de soluto} = \frac{\text{volumen total} * \text{densidad del disolvente}}{\frac{1}{\%} - 1}$$

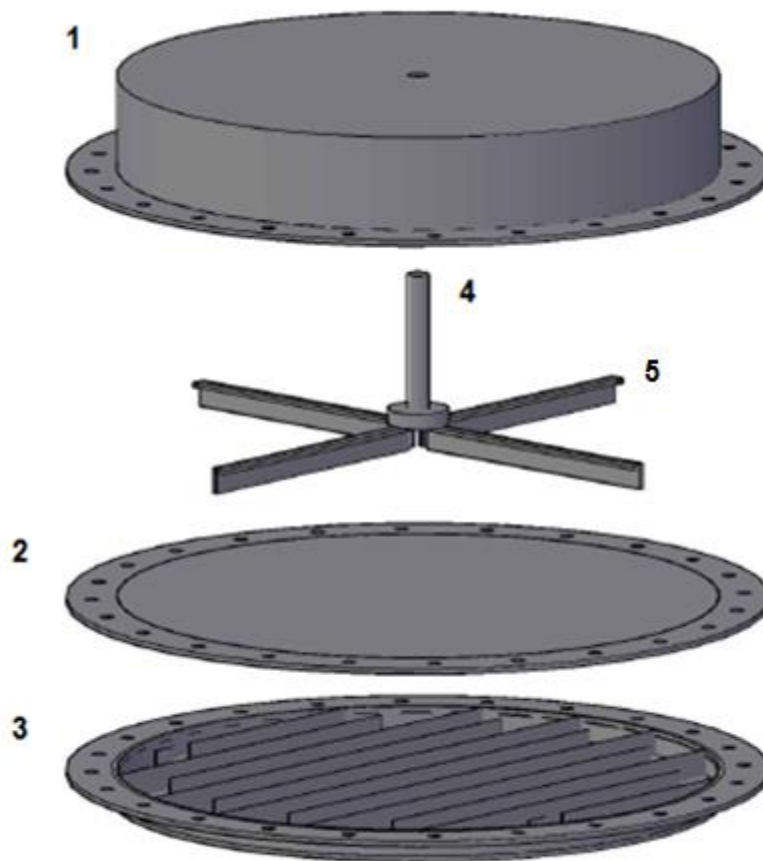
La cantidad de cloruro cálcico a emplear son 51 Kg.

Volumen total (m3)	0,1521
Porcentaje de CaCl2 (%)	25
Densidad del agua (kg/m3)	1000
Masa de agua (kg)	152
Cantidad de CaCl2 (kg)	51

### 2.3. Intercambiador de calor de placas

En la parte superior del intercambiador de calor de placas tiene lugar la generación del hielo líquido a partir de una disolución de cloruro sódico. Esta disolución es enfriada por la disolución de cloruro cálcico que circula por la parte inferior del intercambiador.

La configuración del intercambiador es la siguiente:



*Figura 11: Intercambiador de calor de placas*

donde se puede apreciar las siguientes partes:

1. Volumen donde se encuentra la disolución de cloruro sódico y donde se va a generar el hielo líquido.
2. Placa donde se produce el intercambio de calor entre la disolución de cloruro sódico y la disolución de cloruro cálcico.
3. Volumen por el que va a circular la disolución de cloruro cálcico.
4. Eje de giro al que se le acoplará el motor y una reductora.
5. Palas rascadoras encargadas de arrancar los cristales generados y mezclarlos con el fluido.

A continuación se van a tratar cada una de las partes de manera más detallada.

### **Depósito donde se genera el hielo líquido**

En esta parte del intercambiador se va a introducir la disolución de cloruro sódico procedente de un depósito de 150 litros de capacidad con la ayuda de una tercera bomba centrífuga. En dicho depósito se va a preparar la disolución a las distintas concentraciones a estudiar, y se va a introducir en su interior una resistencia eléctrica, para que una vez terminado cada ensayo, se bombee una disolución más caliente y así derretir el hielo formado y recircularlo.



*Figura 12: Deposito donde se almacena la disolución de cloruro sódico*



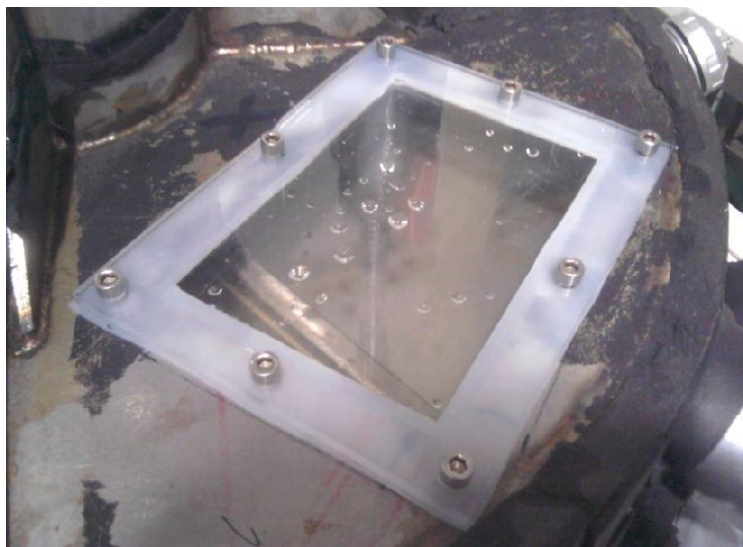
*Figura 13: Resistencia introducida en el interior del depósito donde se almacena la disolución de cloruro sódico*

El parámetro que se va a medir de este fluido va a ser la temperatura. Por ello se dispone de cuatro sondas PT100 que se introducen por los laterales del intercambiador de placas, situadas de forma radial y cada 90°.



*Figura 14: Parte superior del intercambiador*

Además de los orificios correspondientes a las cuatro PT100, se tienen dos orificios más en la parte superior y en la parte lateral para el llenado y vaciado comentado anteriormente, y un corte rectangular realizado en la parte superior para visualizar el fluido en el interior y el movimiento de las palas.



*Figura 15: Corte rectangular en la zona superior*



Se puede decir que se tiene una visualización global del proceso, ya que se han instalado dos cámaras. Una en el corte rectangular, donde se ha colocado una placa de metacrilato. Y otra paralela al circuito de llenado y vaciado, donde se ha instalado un microscopio (incorpora esta segunda cámara) con el que poder observar el tamaño del hielo formado, y una bomba que ayude a circular el hielo líquido.



*Figura 16: Circuito paralelo formado por microscopio y bomba*

En la placa de metacrilato se ha colocado un purgador para sacar el aire que queda en el interior y ver una imagen no distorsionada.



*Figura 17: Cámara y sistema de purgado colocado en la placa de metacrilato*

### **Placa de intercambio de calor**

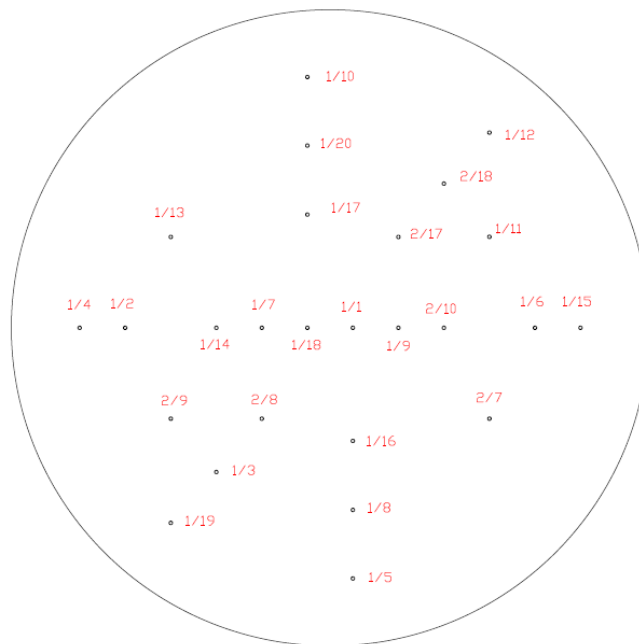
En esta placa se produce la parte más importante del proceso. Es donde la disolución de cloruro cálcico enfría a la disolución de cloruro sódico.

Para evaluar la transferencia de calor será necesario medir dos temperaturas relacionadas con la disolución de cloruro sódico. Una va a ser la temperatura de la salmuera, obtenida por las cuatro PT100, mientras que la otra es la temperatura de pared o superficie de intercambio. El calor absorbido por el cloruro cálcico lo determinaremos en la otra parte del intercambiador.

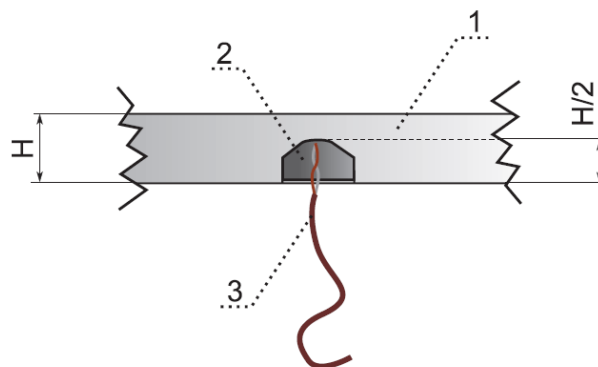
La medida de la temperatura de pared en la placa se va a obtener por medio de 26 termopares distribuidos como se muestra a continuación. Estos van a estar soldados a la placa, a la cual se le ha realizado un agujero hasta aproximadamente la mitad del espesor de la misma (1), con un diámetro de 4mm. Este agujero va relleno del material de aporte de la soldadura (2), que a su vez suelda las dos puntas del cable de termopar (3). De esta forma el



termopar queda completamente soldado a la placa. En el Anexo 8 se explicará el proceso de calibración de los termopares.



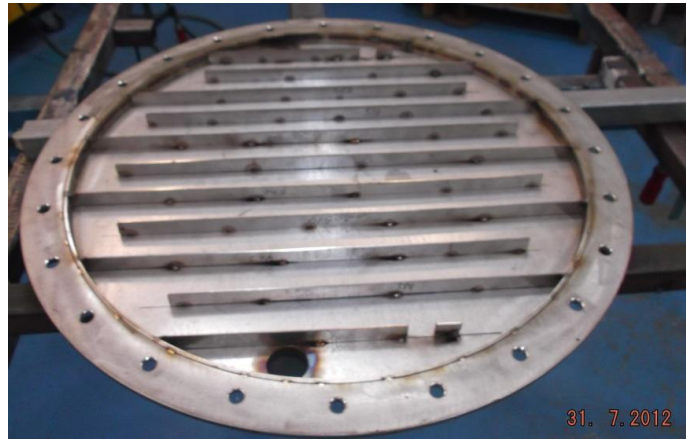
*Figura 18: Distribución de los termopares soldados en la placa*



*Figura 19: Esquema de la soldadura de los termopares a la placa*

### **Circuito por el que circula la disolución de cloruro cálcico**

La disolución de cloruro cálcico va a recorrer un serpentín con el fin de poder enfriar la disolución de cloruro sódico. Este serpentín se ha realizado a partir de la disposición en paralelo de 11 pletinas. Las pletinas próximas a los orificios de entrada y salida del fluido se han separado en dos secciones para evitar un posible estrangulamiento del fluido.



*Figura 20: Volumen por el que va a circular la disolución de cloruro cálcico*

El calor absorbido por el cloruro cálcico se va a determinar midiendo temperatura a la entrada y a la salida del serpentín por medio de dos sondas PT100.

### **Sistema de rascado**

El motor utilizado para accionar las palas tiene una potencia de 0,75 kW. Lleva conectado una reductora de relación 1/25, obteniendo más par y por tanto reduciendo la oposición al giro cuando se genera el hielo líquido. Por motivos de seguridad, se ha programado el variador de frecuencia con el fin de que el par que se genera no produzca daño en las palas, haciendo que se pare el sistema en caso de posible avería.



*Figura 21: Motor de 0.75 kW de potencia*



*Figura 22: Reductora 1/25*

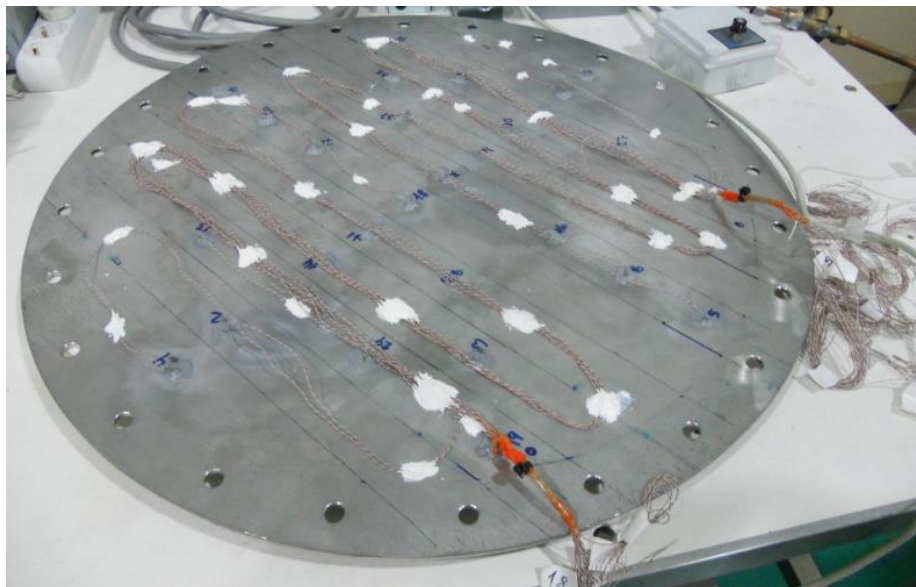
En cuanto a las palas, las cuatro están diseñadas con un perfil angular en L para aumentar la resistencia a la flexión de las mismas. Llevan además atornillada un material plástico denominado PEEK capaz de arrancar el hielo y así evitar que entre en contacto metal con metal.



*Figura 23: Palas rascadoras con perfil en L y PEEK atornillado*

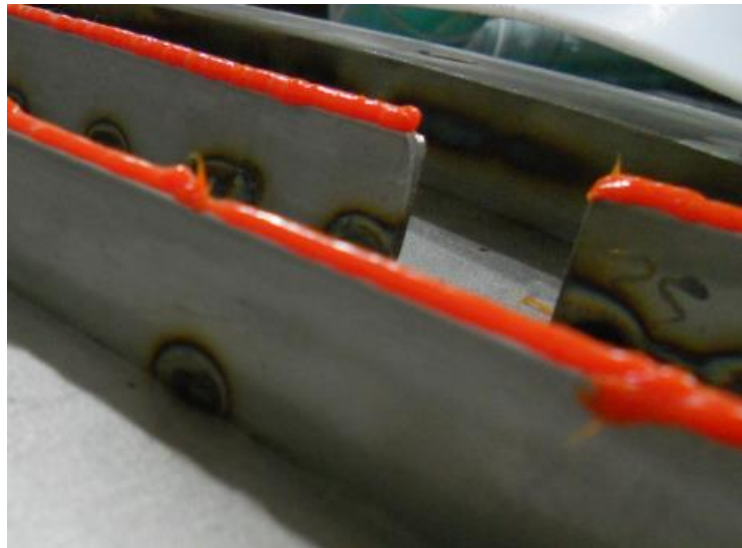
## **Ensamblaje**

Debido a que una parte de los termopares van a estar bañados por la disolución de cloruro cálcico, se ha decidido pegar con silicona estos y pasarlos por un tubo de plástico, y posteriormente hacerlos salir por sendos pasamuros. La idea de pegarlos es porque estos van a realizar el recorrido del serpentín.



*Figura 24: Detalle de los termopares en la placa de intercambio de calor*

Como además el cable de los termopares es muy frágil, se ha colocado un producto plástico (Nural 28) sobre cada pletina que evite que estos se partan por algún posible contacto de estos entre metales. Así mismo hace de relleno, sellando por completo los distintos y evitando que haya flujos secundarios de uno a otro.



*Figura 25: Producto plástico dispuesto en los bordes de las pletinas*

Para sellar las distintas partes del intercambiador se ha dispuesto teflón de 3mm de espesor entre cada zona de contacto entre metales, actuando como junta.



*Figura 26: Teflón dispuesto entre placas*

En cuanto a las tuberías empleadas, se ha considerado para la parte de circulación de la disolución de cloruro cálcico tubería de PVC flexible y PVC rígida, de diámetros 25, 32 y 50 mm, con uniones tanto de rosca como de pegar, en función de las necesidades. Para la parte de refrigerante, tubería de cobre con todas las uniones soldadas, de 5/8", 3/8" y 1/2".

### **3. Instrumentación**

En este apartado vamos a detallar los instrumentos empleados para llevar a cabo las medidas necesarias, así como la adquisición de datos, ya que nuestro objetivo será monitorizar las variables que influyen en la transferencia de calor que se produce en el intercambiador de calor de placas. Las medias necesarias se presentan a continuación.

#### **3.1. Caudal de la disolución de cloruro cálcico**

Se va a emplear un caudalímetro coriolis para la medida del caudal de disolución de cloruro cálcico. Este va a estar situado a la salida del intercambiador de placas. El tipo de conexión es mediante cable de cuatro hilos, y la alimentación a 230 Vac. Pertenece a la marca comercial Emerson, y más en concreto Micro Motion de la serie 2000.

#### **3.2. Temperatura de la disolución de cloruro cálcico**

Se medirá la temperatura del cloruro cálcico a la entrada y salida del intercambiador de placas mediante sondas de temperatura PT100 de tipo 1/10, dispuestas en el sentido de la dirección del flujo. Estas medidas, junto con el caudal y valores tabulados del calor específico nos proporcionaran el flujo de calor absorbido por el cloruro cálcico.

Se han situado además dos termopares tipo T en la entrada y salida del evaporador con el fin de conocer, a modo de información, el enfriamiento producido por el refrigerante.

#### **3.3. Temperatura de la disolución de cloruro sódico**

Esta medida sirve para conocer la transferencia de calor en el lado de la disolución de cloruro sódico, que se estima a partir de la diferencia entre las

temperaturas en la pared y en el fluido. Para ello se emplearán cuatro sondas PT100 situadas de forma radial y cada 90°, entrando desde los laterales del intercambiador hasta el centro, a media altura. Su longitud es tal que abarca hasta un poco más del centro del radio. De esta forma se consigue conocer con gran precisión de la temperatura media del fluido.

### **3.4. Temperatura en la pared del intercambiador de placas**

Temperatura obtenida a partir de los 26 termopares de tipo T soldados a la placa. Estos termopares están fabricados a partir de cable de termopar y empleando la misma soldadura para unir ambos conductores entre sí como para unir estos a la placa.

### **3.5. Medidor de la potencia activa consumida por el motor**

Es necesario conocer la potencia que se está consumiendo en el rascador para poder introducirla en el criterio de mejora de la transferencia de calor en el intercambiador. De esta forma se obtiene un conocimiento real de los beneficios del mismo.

Para ello, se emplea un transductor de potencia activa conectado a la salida del variador de frecuencia que alimenta el motor del rascador. Este transductor tiene una salida analógica 0-10v que permite conocer el valor de la potencia. La situación de este instrumento queda emplazada en el cuadro eléctrico de la instalación.

### **3.6. Velocidad de giro del rascador**

Para establecer los distintos regímenes de giro es necesario un tacómetro con salida analógica 0-10V. Como sensor, se ha decidido optar por un captador de efecto Hall, que detecta variaciones o movimientos de elementos magnéticos a una distancia igual o menos a 2 mm. Este sensor, alimentado



desde el propio tacómetro, devuelve una señal de pulso que el tacómetro contabiliza para obtener velocidad de giro o periodo, así como también conteo.

Para activar el sensor se empleará el eje del rascador, y como discontinuidad magnética el propio tornillo de fijación del eje del rascador a la reductora de revoluciones.

### **3.7. Temperatura del refrigerante**

Como se dijo anteriormente, la temperatura y presión del refrigerante no son relevantes en los ensayos, pero si es importante tener información de ellos para conocer el comportamiento del refrigerante. Se va a medir la temperatura con sondas de temperatura PT100 ubicadas a la entrada y salida del intercambiador de calor, y en el depósito de líquido.

### **3.8. Temperatura ambiente, temperatura en la reductora y temperatura en el aislante del rascador**

Para establecer un balance de pérdidas se ha decidido medir la temperatura ambiente, la temperatura en la reductora y la temperatura en el aislante de la superficie superior del intercambiador de calor de placas mediante sondas PT100.

### **3.9. Presión del refrigerante**

Debido a que el refrigerante trabaja en un rango de presiones, se han instrumentado dos sensores de presión absoluta a la entrada y salida del intercambiador de calor, y un tercer sensor de presión, este de tipo diferencial, en el depósito de líquido.

### 3.10. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se empleará un Data Logger modelo Agilent 34970A con tres tarjetas 34901-A de 20 canales cada una y multiplexor de red, de la marca comercial HP. Estas tarjetas permiten la medida de señales analógicas tanto de tensión como de intensidad, a dos y a cuatro hilos.

La relación de los distintos canales con su señal se muestra a continuación, con los respectivos ajustes de gain y offset para obtener la medida real de la señal de salida.

Tarjeta 1							
Canal	Sensor	Configuración	Gain	Offset	Unidad	Limite superior	Limite inferior
1	Termopar 1	Temp type T	-	-	-	-	-
2	Termopar 2	Temp type T	-	-	-	-	-
3	Termopar 3	Temp type T	-	-	-	-	-
4	Termopar 4	Temp type T	-	-	-	-	-
5	Termopar 5	Temp type T	-	-	-	-	-
6	Termopar 6	Temp type T	-	-	-	-	-
7	Termopar 7	Temp type T	-	-	-	-	-
8	Termopar 8	Temp type T	-	-	-	-	-
9	Termopar 9	Temp type T	-	-	-	-	-
10	Termopar 10	Temp type T	-	-	-	-	-
11	Termopar 11	Temp type T	-	-	-	-	-
12	Termopar 12	Temp type T	-	-	-	-	-
13	Termopar 13	Temp type T	-	-	-	-	-
14	Termopar 14	Temp type T	-	-	-	-	-
15	Termopar 15	Temp type T	-	-	-	-	-
16	Termopar 16	Temp type T	-	-	-	-	-
17	Termopar 17	Temp type T	-	-	-	-	-
18	Termopar 18	Temp type T	-	-	-	-	-
19	Termopar 19	Temp type T	-	-	-	-	-
20	Termopar 20	Temp type T	-	-	-	-	-

Figura 27: Tarjeta de adquisición de datos número 1

Tarjeta 2							
Canal	Sensor	Configuración	Gain	Offset	Unidad	Limite superior	Limite inferior
1	PT100 Entrada Serpentin	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
2	PT100 Salida Serpentin	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
3	PT100 Rascador C1	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
4	PT100 Rascador L1	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
5	PT100 Rascador C2	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
6	PT100 Rascador L2	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
7	Termopar 27	Temp type T	-	-	-	-	-
8	Termopar 28	Temp type T	-	-	-	-	-
9	Termopar 29	Temp type T	-	-	-	-	-
10	Termopar 30	Temp type T	-	-	-	-	-
11	PT100 Entrada Serpentin	-	-	-	-	-	-
12	PT100 Salida Serpentin	-	-	-	-	-	-
13	PT100 Rascador C1	-	-	-	-	-	-
14	PT100 Rascador L1	-	-	-	-	-	-
15	PT100 Rascador C2	-	-	-	-	-	-
16	PT100 Rascador L2	-	-	-	-	-	-
17	Termopar 37	Temp type T	-	-	-	-	-
18	Termopar 38	Temp type T	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-
20	Watimetro	DC Volts	80	0	W	800	0
21	Coriolis	DC Current	6875	-27,5	kg/min	110	90

Figura 28: Tarjeta de adquisición de datos número 2

Tarjeta 3							
Canal	Sensor	Configuración	Gain	Offset	Unidad	Limite superior	Limite inferior
1	PT100 Salida Evaporador	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
2	PT100 Entrada Evaporador	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
3	PT100 Ambiente	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
4	PT100 Perdidas 1 (clavija)	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
5	PT100 Perdidas 2 (conect)	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-
7	PT100 Calderín	Temp 4W sensor	-	-	-	-	-
8	Tacómetro	DC Volts	6	0	rpm	60	5
9	Termopar Salida Evaporador	Temp type T	-	-	-	0	-20
10	Termopar Entrada Evaporador	Temp type T	-	-	-	-	-
11	PT100 Salida Evaporador	-	-	-	-	-	-
12	PT100 Entrada Evaporador	-	-	-	-	-	-
13	PT100 Ambiente	-	-	-	-	-	-
14	PT100 Perdidas 1 (aislante)	-	-	-	-	-	-
15	PT100 Perdidas 2 (reductora)	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	PT100 Calderín	-	-	-	-	-	-
18	Presión Entrada Evaporador	DC Volts	2,0002	-0,006	bar	6	2,5
19	Presión Salida Evaporador	DC Volts	2,0008	-0,004	bar	-	-
20	Presión Calderín	DC Volts	2,0004	-0,0128	bar	24	15

Figura 29: Tarjeta de adquisición de datos número 3

## 4. Resultados

Para el estudio del hielo líquido se va a partir de dos distintas disoluciones de cloruro sódico preparadas en el tanque de 150 litros de capacidad. La primera disolución va a tener una concentración de 29.60 g/l de NaCl, mientras que la segunda es de 49.40 g/l. Además se va a variar las revoluciones del sistema de rascado, desde 5 hasta 50 rpm, así como el salto de temperatura entre la disolución de cloruro cálcico en el tanque de amortiguamiento y la temperatura de congelación de la disolución de cloruro sódico. Estos saltos de temperatura van a ser de 2.50°C y 4.90°C. De esta manera, se va a determinar el efecto que tiene la modificación de estos parámetros (concentración, régimen de giro y salto de temperatura) sobre la generación de hielo.

Las propiedades del cloruro sódico para las distintas concentraciones, obtenidas por interpolación lineal, son:

NaCl (gr/l, 20°C)	% NaCl	Densidad (kg/m <sup>3</sup> , 20°C)	T <sub>g</sub> Congelación (°C)
29,6	2,9	1019	-1,66
49,4	4,8	1032	-2,77

Figura 30: Propiedades de las disoluciones a estudiar

Los ensayos realizados han sido los siguientes:

	NaCl (gr/l, 14°C)	% NaCl	DT	A	B	C	D	E
				RPM				
1	29,6	2,9	4,9	5	10	15	30	50
2	29,6	2,9	2,5	5	10	15	30	50
3	49,4	4,8	2,5	5	10	15	30	50

Figura 31: Tabla de ensayos a realizar

Se va a tomar la formación de un 20% aproximado de hielo como parámetro de finalización del ensayo. Este tanto por ciento de hielo se determina por la siguiente expresión:

$$\% \text{ hielo} = 100 \left( 1 - \frac{\% NaCl_{inicial}}{\% NaCl} \right)$$

donde el tanto por ciento de NaCl es el porcentaje en peso existente en un instante debido al proceso de congelación. Dicho porcentaje de NaCl queda determinado por la correlación

$$\% NaCl = -0.004473 T^2 - 1.6022 T + 0.041643$$

si la temperatura  $T$  es menor que la temperatura de congelación de la disolución para cada concentración. Si la temperatura  $T$  es mayor que la temperatura de congelación, el proceso de congelación no se ha dado aún, siendo  $\% NaCl = \% NaCl_{inicial}$  correspondiente a cada caso.

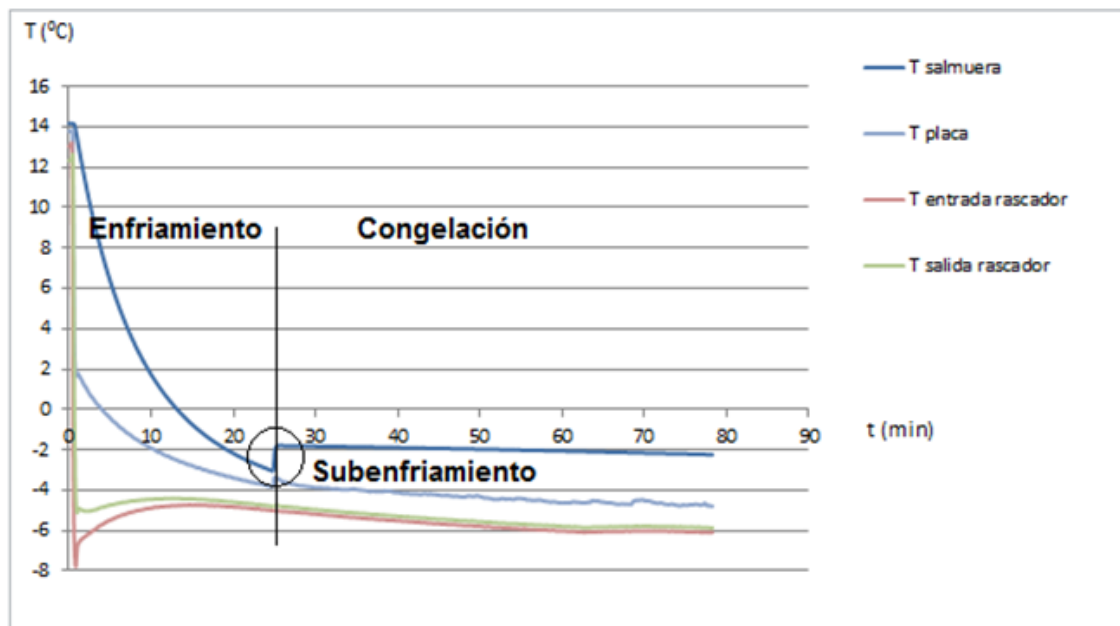
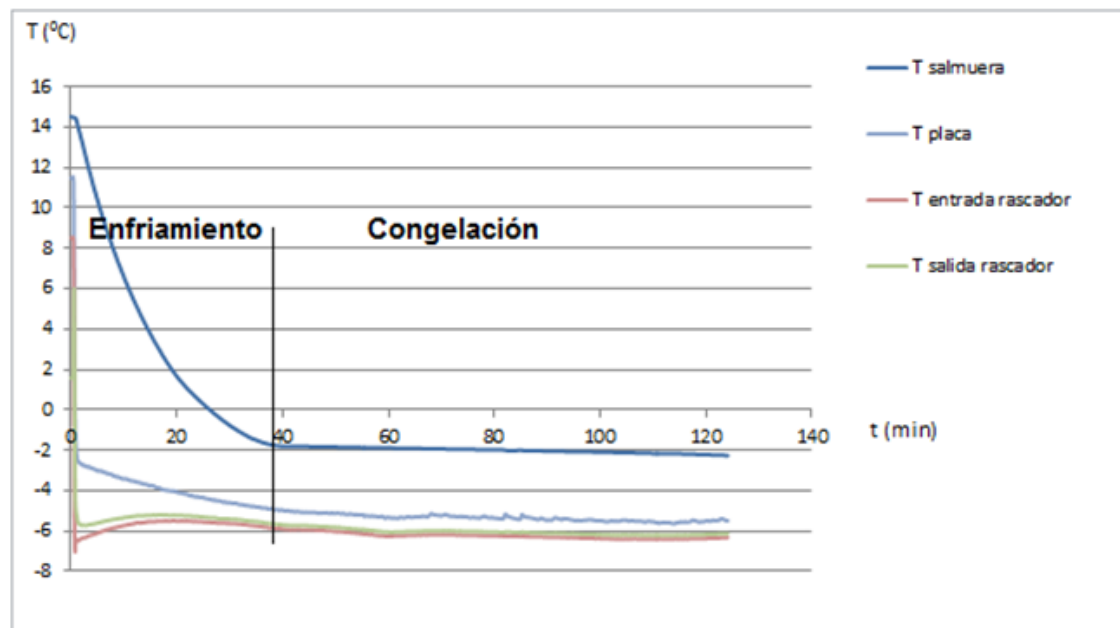
Para cada ensayo se va a determinar lo siguiente:

- Temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo.

Esta temperatura va a ser la obtenida por la media de las cuatro PT100 rascador según refleja la tarjeta de adquisición de datos.

$$T_F = \frac{\sum_{n=1}^4 (PT100 \text{ rascador})}{4}$$

Se observará al representar dicha evolución que la temperatura de la salmuera se estabiliza en su temperatura de congelación. La temperatura de pared es menor que la temperatura de la salmuera como debe de ser para que se produzca el proceso de enfriamiento. Y lo mismo ocurre con las temperaturas de entrada y salida del rascador, temperaturas menores a las dos temperaturas anteriores por el mismo hecho, siendo la temperatura de entrada menor que la de salida para que se dé el enfriamiento en la otra parte del circuito. Además, en función de las condiciones a las que se ensaye, se produce un pico denominado de subenfriamiento debido al descenso de la temperatura por debajo de la temperatura de congelación.



- Evolución del coeficiente de transmisión de calor,  $h$ .

El coeficiente de transmisión de calor  $h$  viene determinado por

$$\dot{Q} = h A (T_F - T_{TC})$$

donde  $T_F$  es la temperatura de la disolución de cloruro sódico obtenida anteriormente, y  $T_{TC}$  la temperatura de la pared de raspado, calculada como la media de los 26 termopares soldados a la placa donde se produce el intercambio de calor entre disoluciones.

El calor  $\dot{Q}$  va a ser el obtenido por el calentamiento de la disolución de cloruro cálcico a través de la superficie de transferencia de calor  $A$ , ya que el calor absorbido por una disolución tiene que ser el mismo que el calor cedido por la otra disolución, y este es

$$\dot{Q} = m_{CaCl_2} C_{p_{CaCl_2}} (T_e - T_s)$$

con  $m_{CaCl_2}$  el caudal que circula por el circuito secundario de enfriamiento y medido por el caudalímetro coriolis.  $C_{p_{CaCl_2}}$  viene dado por la siguiente gráfica

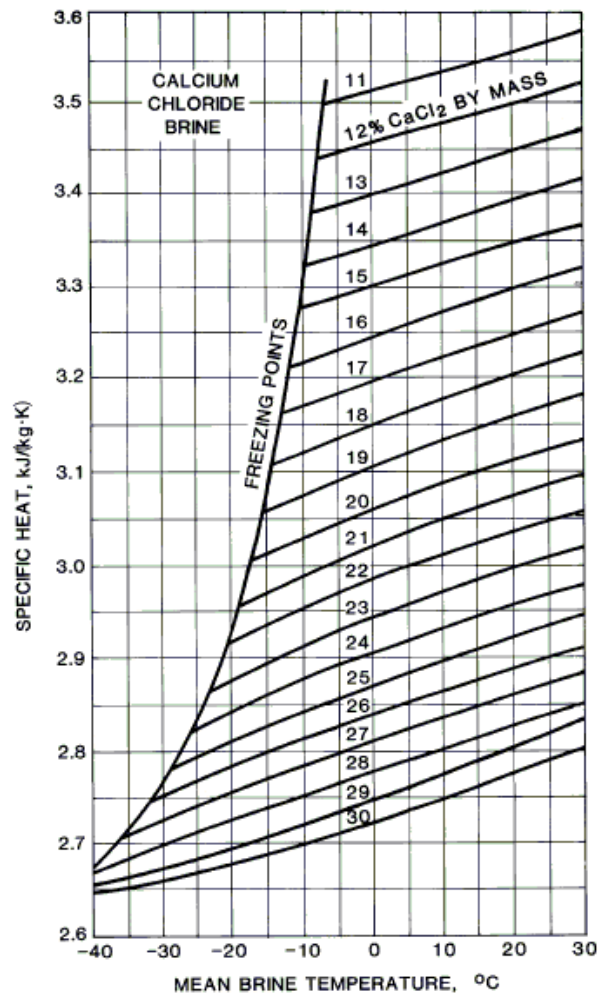


Figura 32: Calor específico del cloruro cálcico en función de la temperatura y la concentración

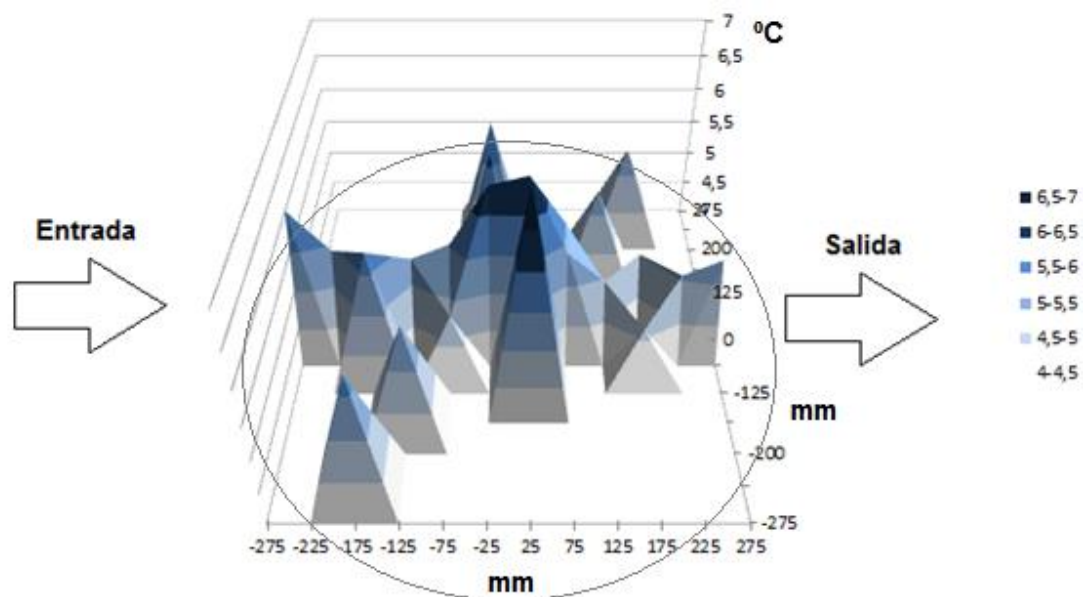
y  $T_e$  y  $T_s$  son las temperaturas de entrada y salida del rascador del cloruro cálcico medidas cada una de ellas por medio de dos PT100. De manera que el coeficiente transmisión de calor es

$$h = \frac{m_{CaCl_2} C_{p_{CaCl_2}} (T_e - T_s)}{A (T_F - T_{TC})}$$

Queda destacar que  $A$  es la superficie de la placa menos la de las pletinas soldadas a la misma y que hacen de serpentín.

- Distribución de la temperatura en la superficie de la placa del intercambiador de calor.

Por medio de la temperatura final de cada termopar soldado a la placa se realiza un mapa de temperaturas para ver qué zonas son las de mayor y menor temperatura. La distribución de temperaturas representada esta invertida, mostrándose el valor absoluto de la temperatura, donde la parte más fría viene representada por un azul más intenso. La zona de entrada y de salida del refrigerante secundario al serpentín es la que se muestra.





- Potencia frigorífica obtenida en la instalación.

La potencia frigorífica va a venir dada por

$$\dot{Q} = \frac{\frac{m_i + m_{i-1}}{2} \frac{C_{p_i} + C_{p_{i-1}}}{2} (T_i - T_{i-1}) + (m_{hielo_i} - m_{hielo_{i-1}}) h_f}{t - t_{i-1}}$$

donde  $\frac{m_i + m_{i-1}}{2}$  es la masa de la disolución de cloruro sódico calculada como la media de la masa en un instante de tiempo y la masa en un instante de tiempo anterior. La determinación de esta masa variable con el tiempo se realiza por medio de la siguiente expresión

$$m_i = 29.11 \left(1 - \frac{\%hielo}{100}\right)$$

siendo 29.11 la masa inicial de la disolución de cloruro sódico a enfriar para el caso de una concentración del 2.9%.

El periodo de tiempo  $t - t_{i-1}$  se establece en 6 minutos.  $\frac{C_{p_i} + C_{p_{i-1}}}{2}$  es el calor específico del cloruro sódico, determinado de igual manera que la masa de disolución y obtenido de la gráfica

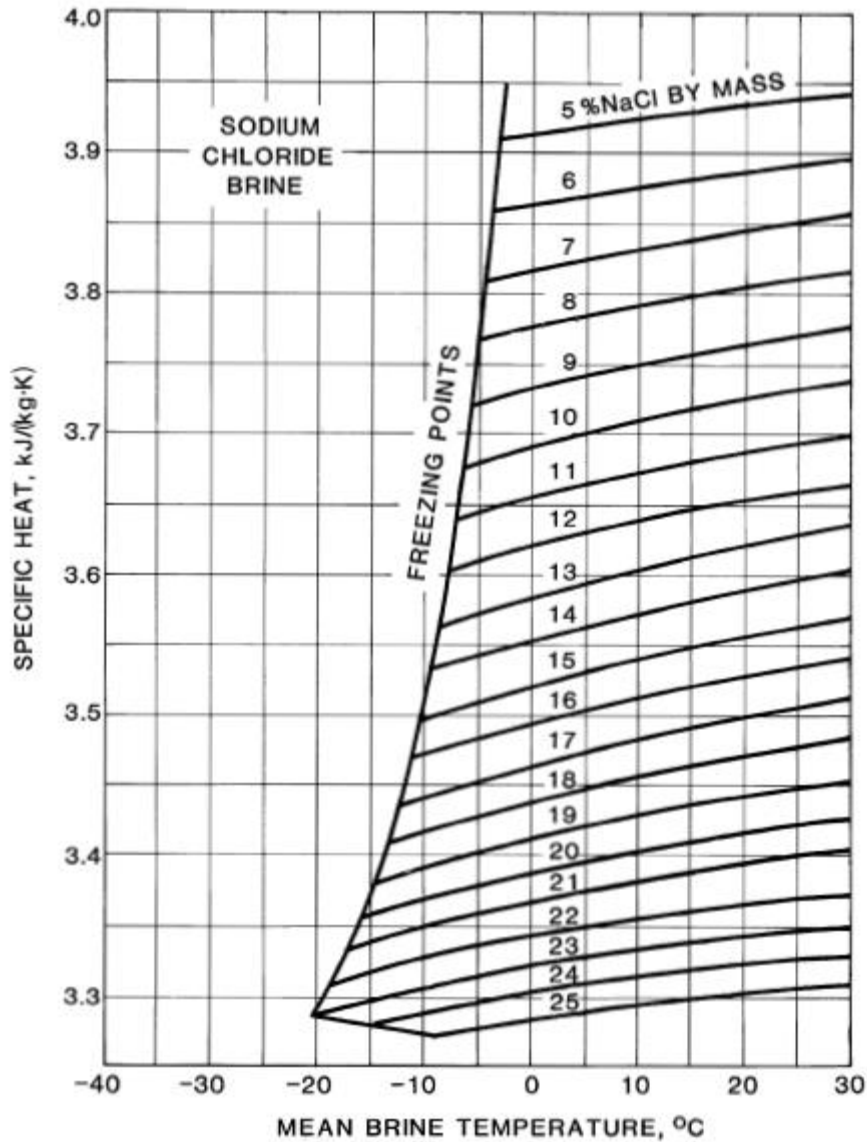
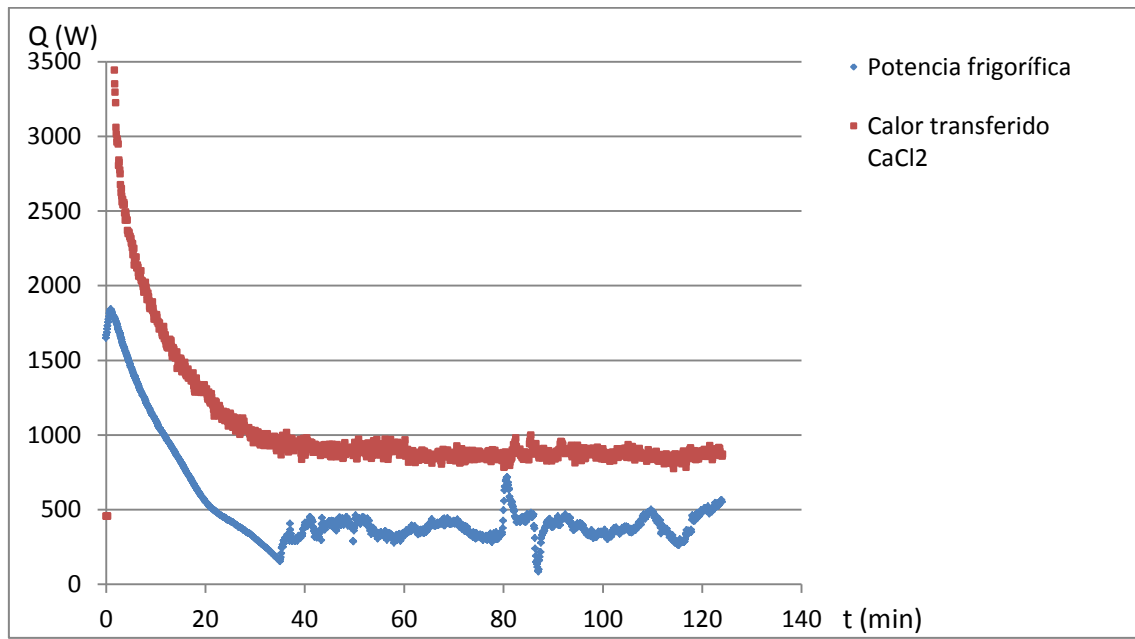


Figura 33: Calor específico del cloruro sódico en función de la temperatura y la concentración

y  $T_i - T_{i-1}$  la variación de la temperatura en ese periodo de tiempo. Este miembro disminuirá conforme el tiempo aumente ya que irá apareciendo masa de hielo por el proceso de enfriamiento, coexistiendo una fase líquida y una fase sólida, teniendo esta fase sólida una energía determinada por esa variación de formación de hielo  $m_{hielo_i} - m_{hielo_{i-1}}$  y el calor latente  $h_f$ , igual a 334.4 kJ/kg. La masa de hielo formada será

$$m_{hielo_i} = 29.11 \frac{\%hielo}{100}$$

Se observará que existe un calor transferido no cuantificado al comparar el calor transferido por la disolución de cloruro cálcico con la potencia frigorífica. Este calor transferido es el resultado de no considerar el enfriamiento de ciertos elementos de la instalación como son las paredes de acero.



- Determinación del número de Nusselt.

El número de Nusselt

$$Nu = \frac{hL}{k_{hl}}$$

es determinado por la longitud característica  $L$  correspondiente a 25mm, altura del volumen donde se produce el raspado.  $k_{hl}$  es la conductividad térmica, que tendrá dos componentes, una correspondiente al hielo  $k_h$  y otra asociada al líquido  $k_{fl}$ , obtenida esta última por la gráfica

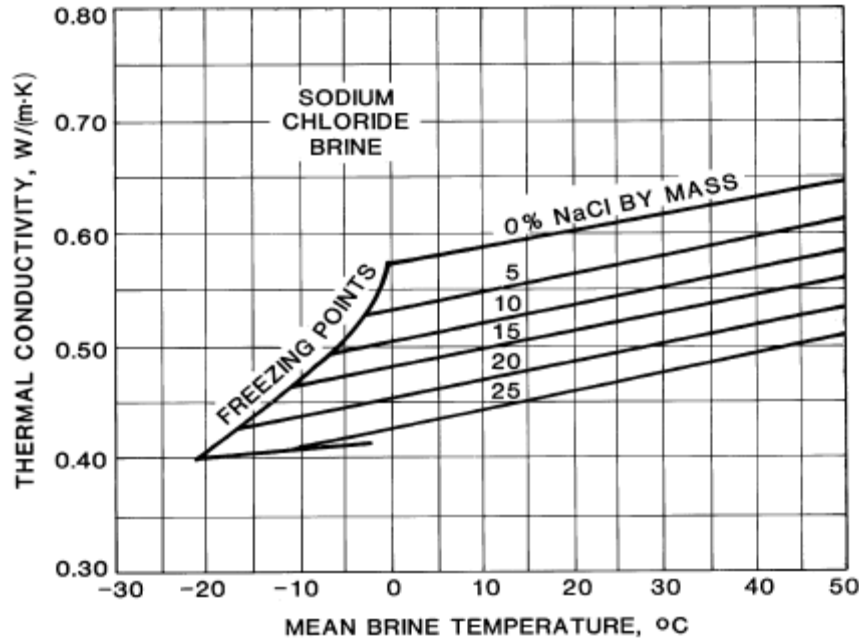


Figura 34: Conductividad térmica del cloruro sódico en función de la temperatura y la concentración

mientras que la conductividad térmica del hielo  $k_h$  viene determinada por la expresión

$$k_h = 2.24 + 5.975 \cdot 10^{-3} (-T)^{1.156}$$

La expresión que nos relaciona la conductividad térmica de las dos fases, y que permite determinar la conductividad térmica del hielo líquido  $k_{hl}$  es

$$k_{hl} = k_{fl} \frac{2k_{fl} + k_h - 2\varphi(k_{fl} - k_h)}{2k_{fl} + k_h + \varphi(k_{fl} - k_h)}$$

El parámetro  $\varphi$  es la fracción volumétrica del hielo, determinado a partir de la masa y la densidad de cada fase. Para la determinación de la densidad del hielo se ha hecho uso de la expresión

$$\rho_h = 917 - 0.1403 T$$

y para la correspondiente al fluido la obtenida por la gráfica siguiente:

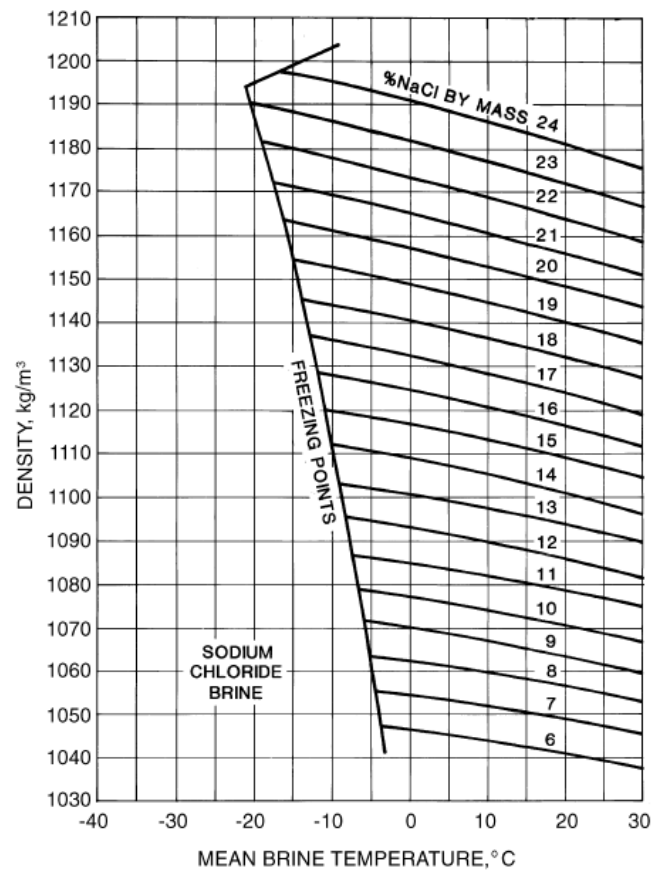


Figura 35: Densidad del cloruro sódico en función de la temperatura y la concentración

$h$  es el coeficiente de transferencia de calor determinado en el segundo punto.

Tras el estudio individual de todos los ensayos, se ha procedido a comparar las distintas situaciones obtenidas, de manera que se puede concluir lo siguiente:

- Para una variación del régimen de giro, manteniendo constantes la concentración y el salto de temperatura, el punto de congelación se alcanza más rápidamente al tener un régimen de giro mayor, salvo si se produce el efecto de subenfriamiento, provocando un incremento de tiempo adicional hasta estabilizarse la temperatura.

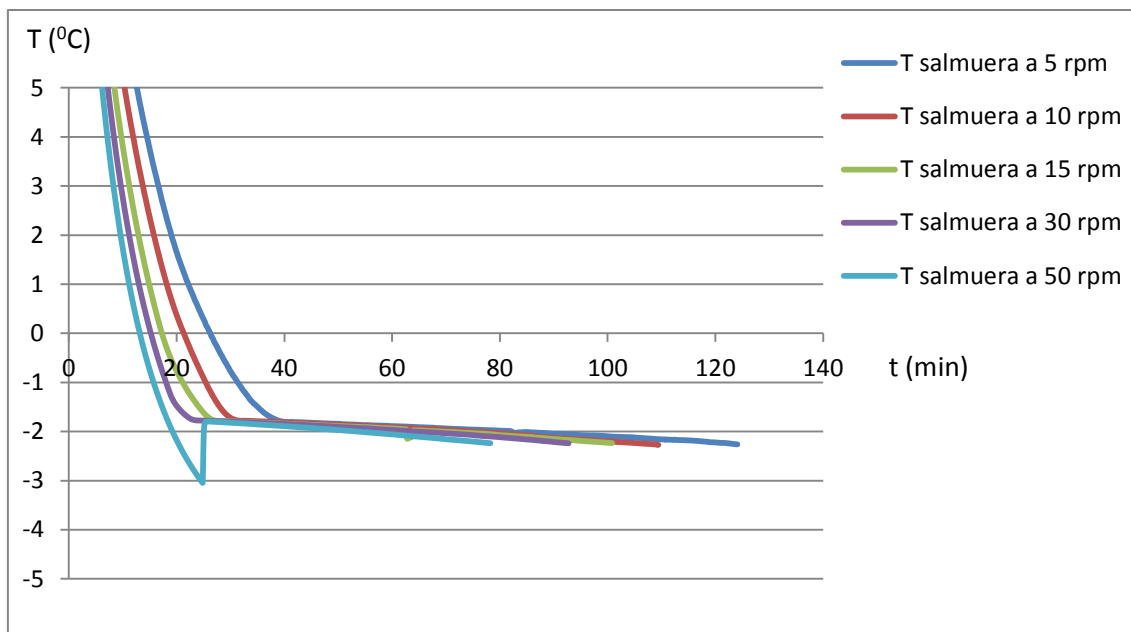


Figura 37: Comparación de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo para una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $4.9^{\circ}\text{C}$

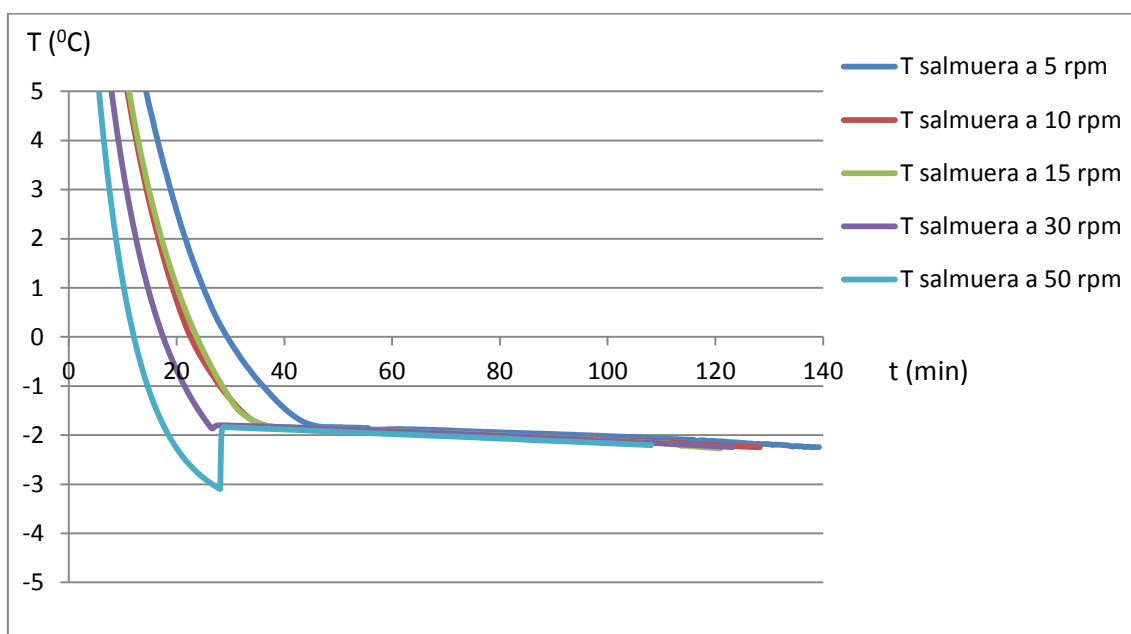


Figura 38: Comparación de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo para una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

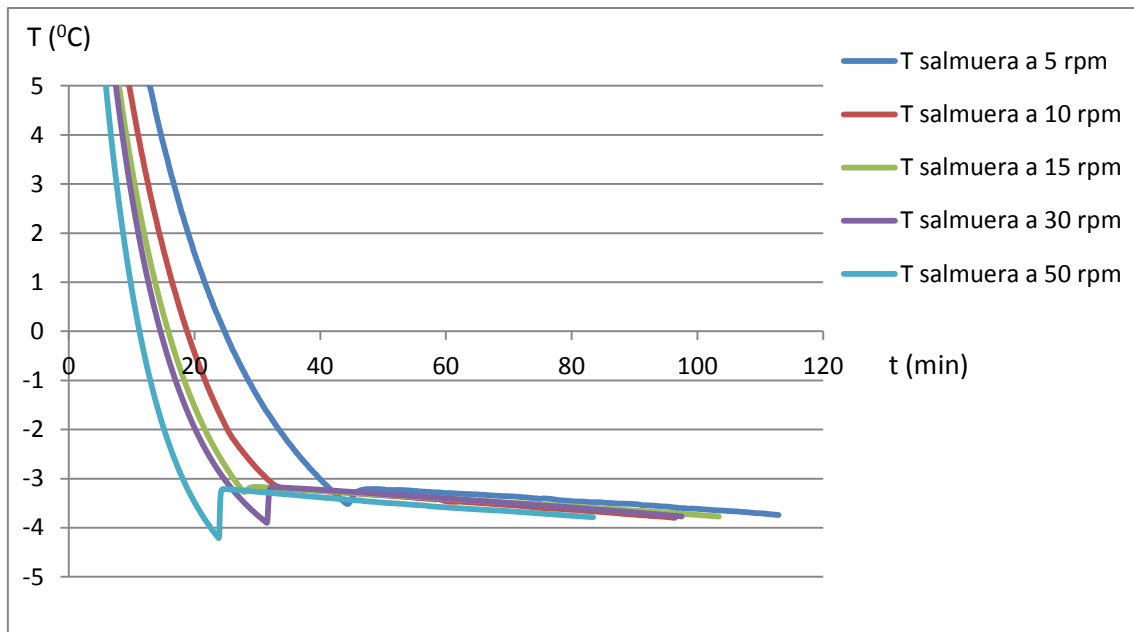


Figura 39: Comparación de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo para una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

- El coeficiente de transmisión de calor  $h$  aumenta al aumentar el régimen de giro del sistema de rascado, observándose valores muy próximos para regímenes de giro bajos. Procesos de enfriamiento mayores provoca descensos más notables en dicho parámetro.

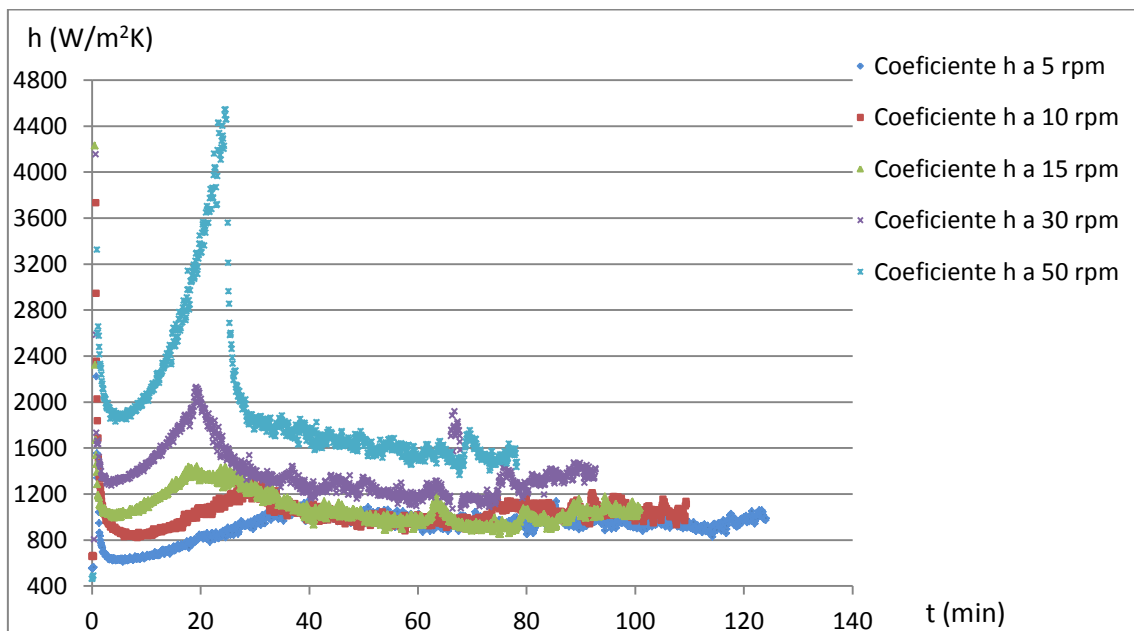


Figura 40: Comparación de la evolución del coeficiente de transmisión de calor para una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $4.9^{\circ}\text{C}$

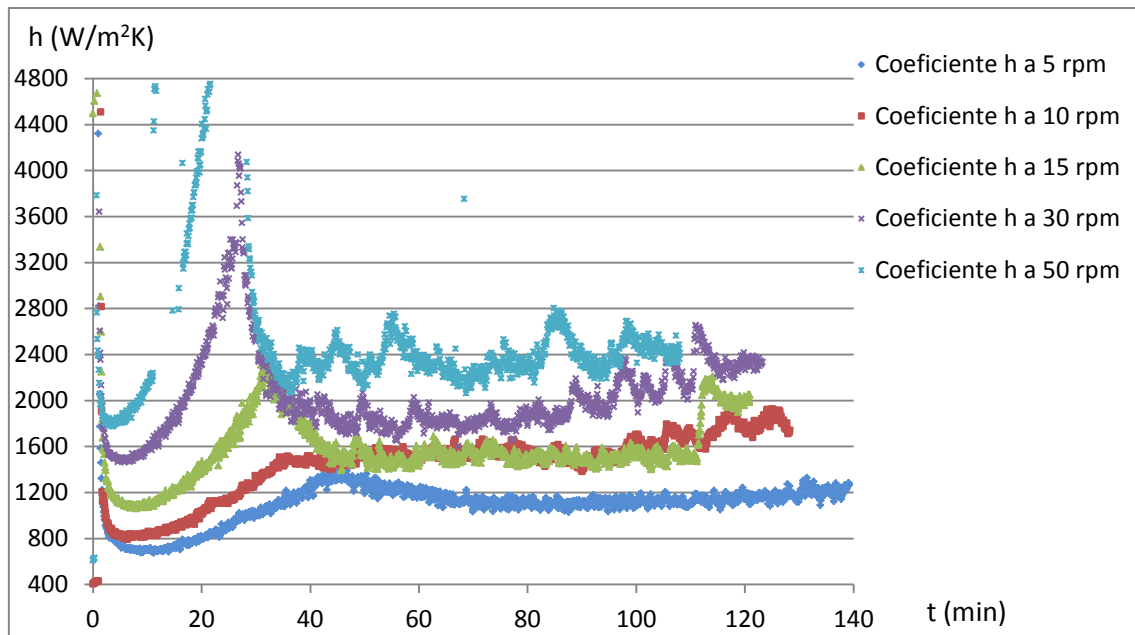


Figura 41: Comparación de la evolución del coeficiente de transmisión de calor para una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

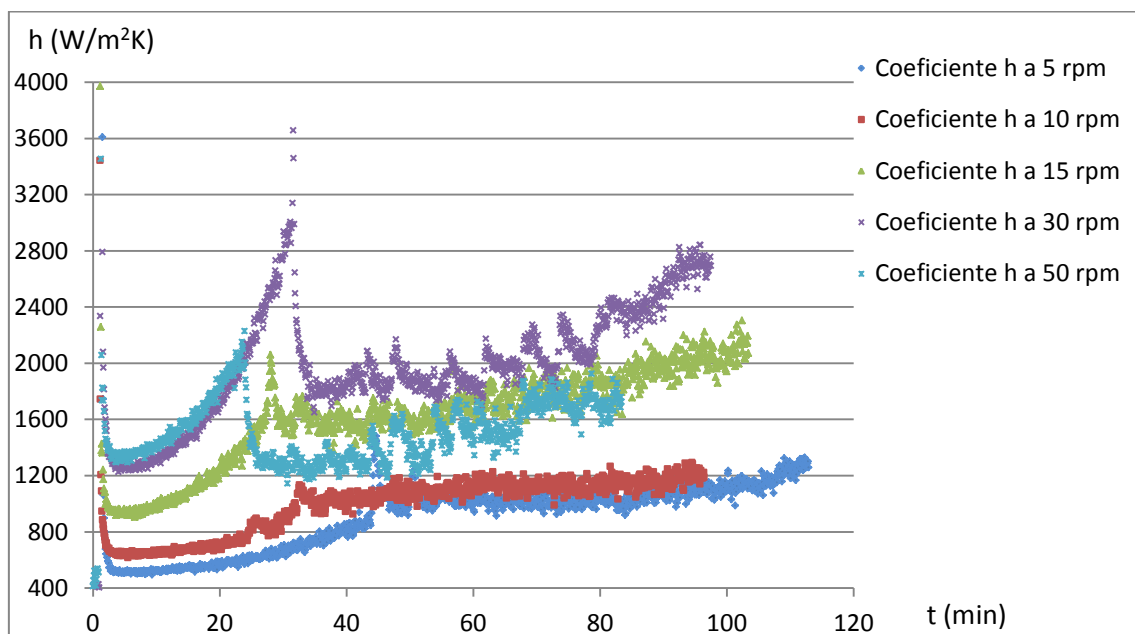


Figura 42: Comparación de la evolución del coeficiente de transmisión de calor para una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

- El número de Nusselt se ve incrementado al aumentar el régimen de giro. De igual manera que para el coeficiente de transmisión de calor, regímenes de giro bajos proporcionan valores muy similares del número de Nusselt. Con el transcurso del tiempo la concentración de hielo aumenta, dificultándose la transferencia de calor por el cambio en las



propiedades de la mezcla. Como consecuencia el número de Nusselt disminuye para todos los casos.

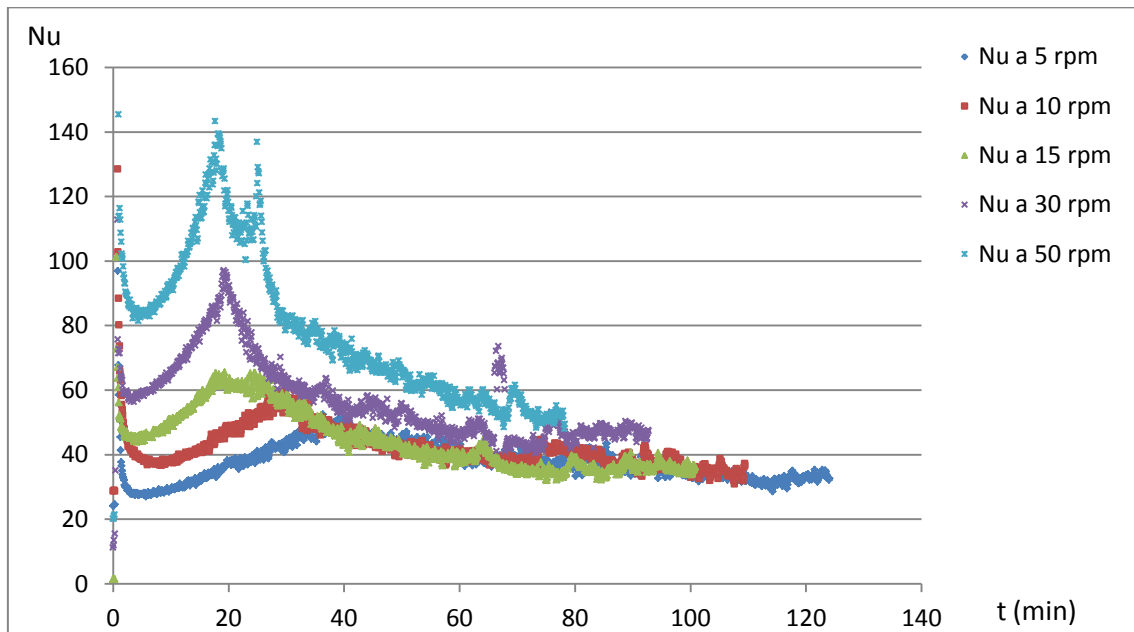


Figura 43: Comparación del número de Nusselt para una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

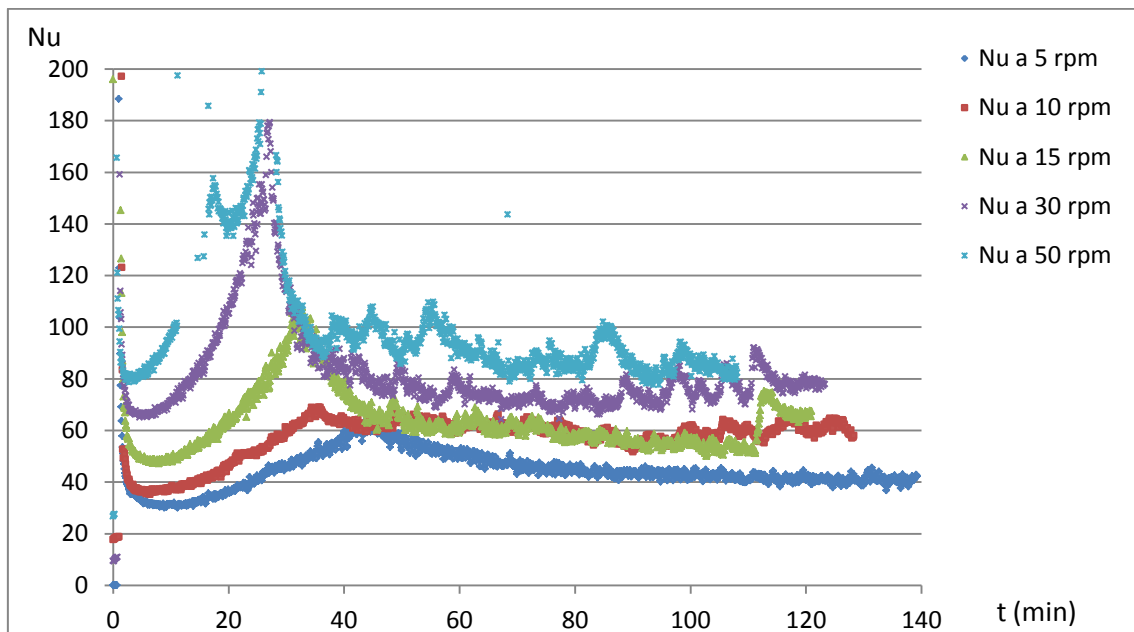


Figura 44: Comparación del número de Nusselt para una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

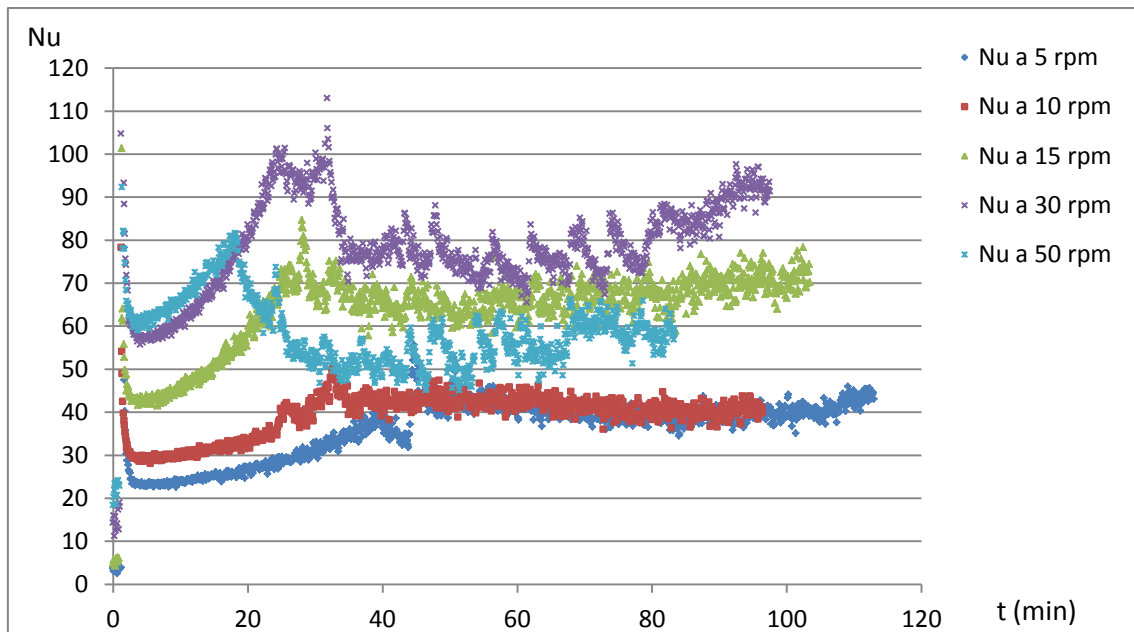


Figura 45: Comparación del número de Nusselt para una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

- La potencia frigorífica se ve afectada también, aumentando si el régimen de giro del sistema de rascado se ve incrementado. Se observa además que para la zona de formación de hielo el valor de la potencia frigorífica es muy próximo a pesar de la variación del régimen de giro.

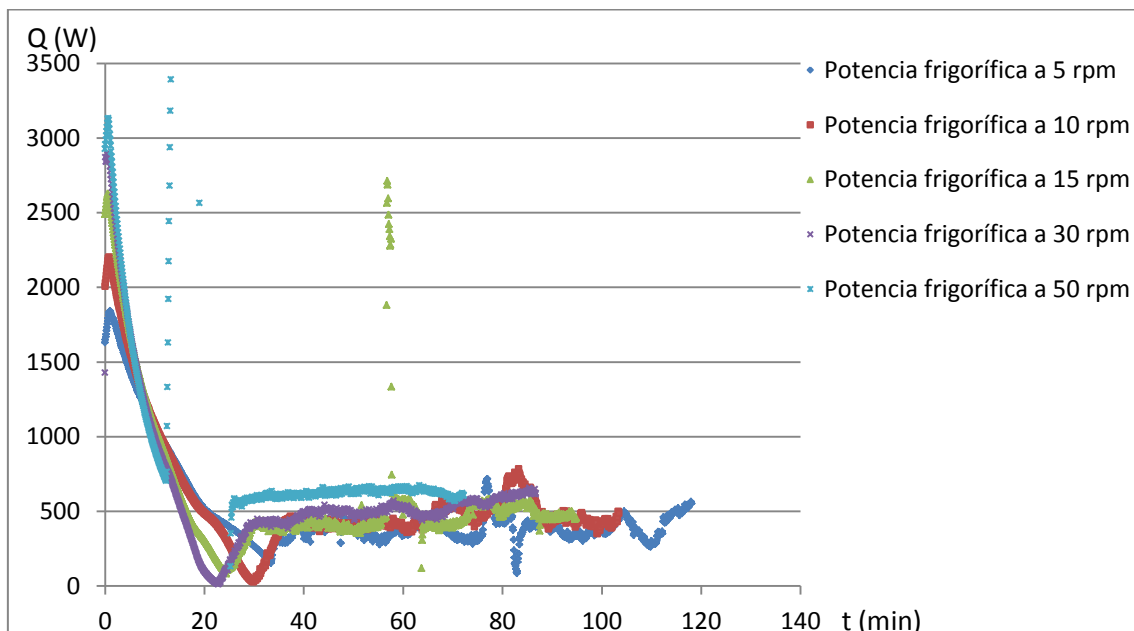


Figura 46: Comparación de la potencia frigorífica para una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

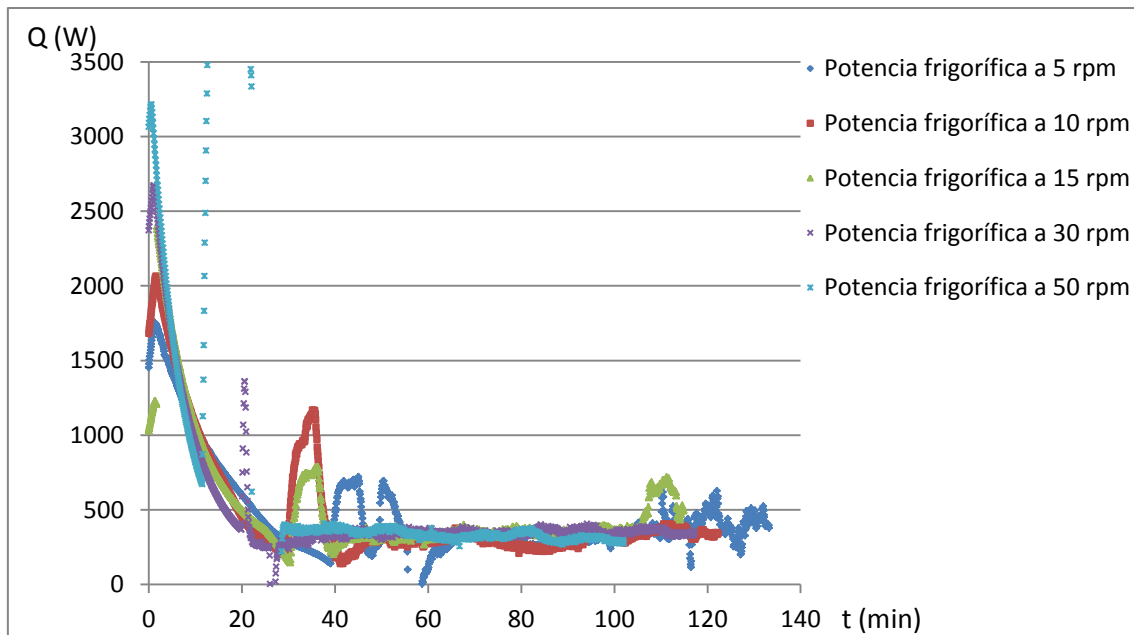


Figura 47: Comparación de la potencia frigorífica para una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

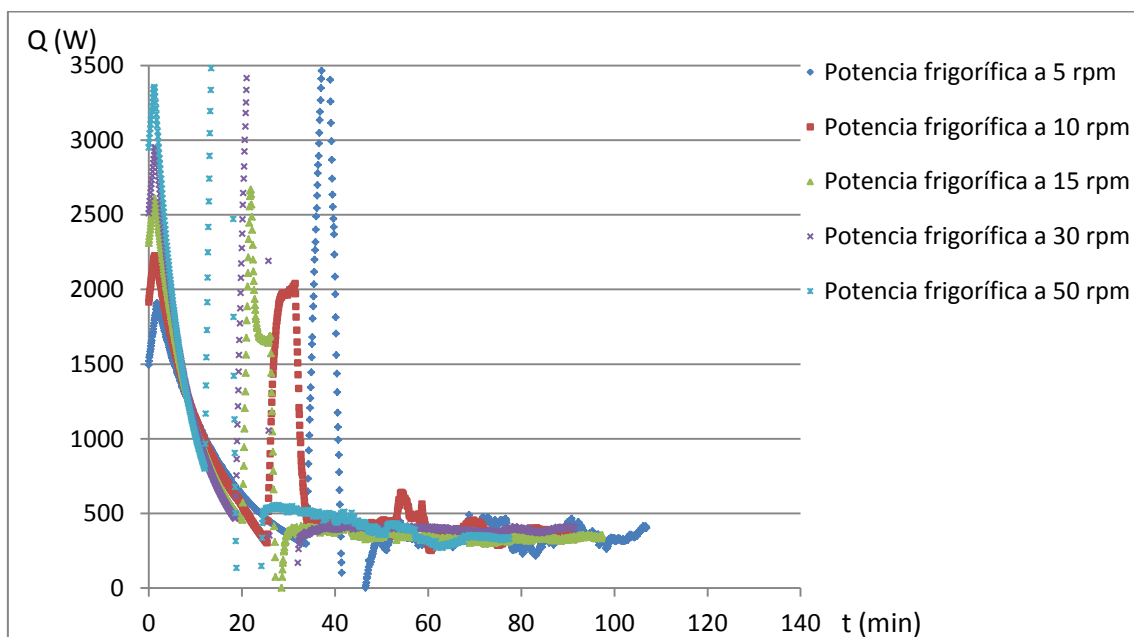


Figura 48: Comparación de la potencia frigorífica para una concentración de 49.4g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

- Manteniendo constante el régimen de giro, el efecto que produce el salto de temperatura se traduce en un proceso de enfriamiento más rápido cuando este salto de temperatura es mayor.

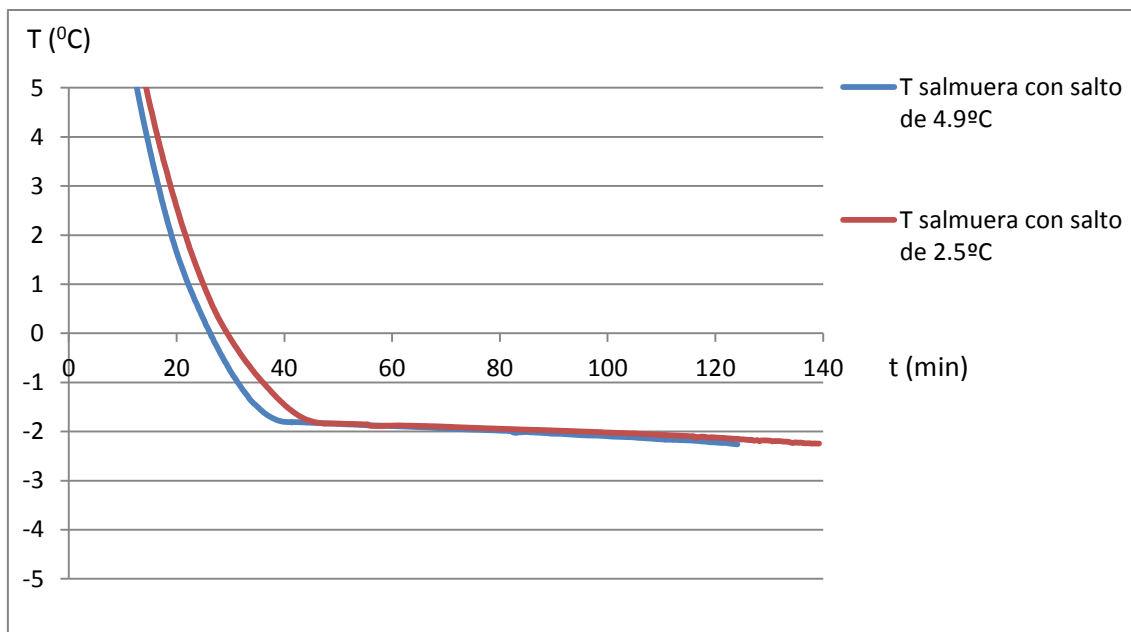


Figura 49: Efecto del salto de temperatura en la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo manteniendo constante el régimen de giro a 5 rpm y la concentración a 29.6 g/l

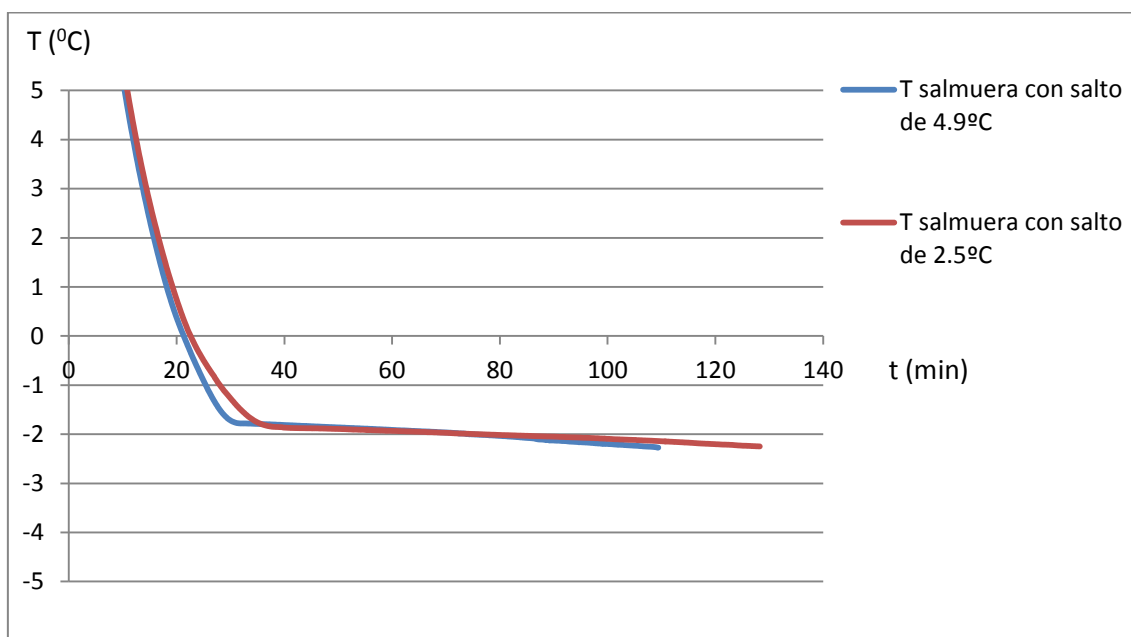


Figura 50: Efecto del salto de temperatura en la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo manteniendo constante el régimen de giro a 10 rpm y la concentración a 29.6 g/l

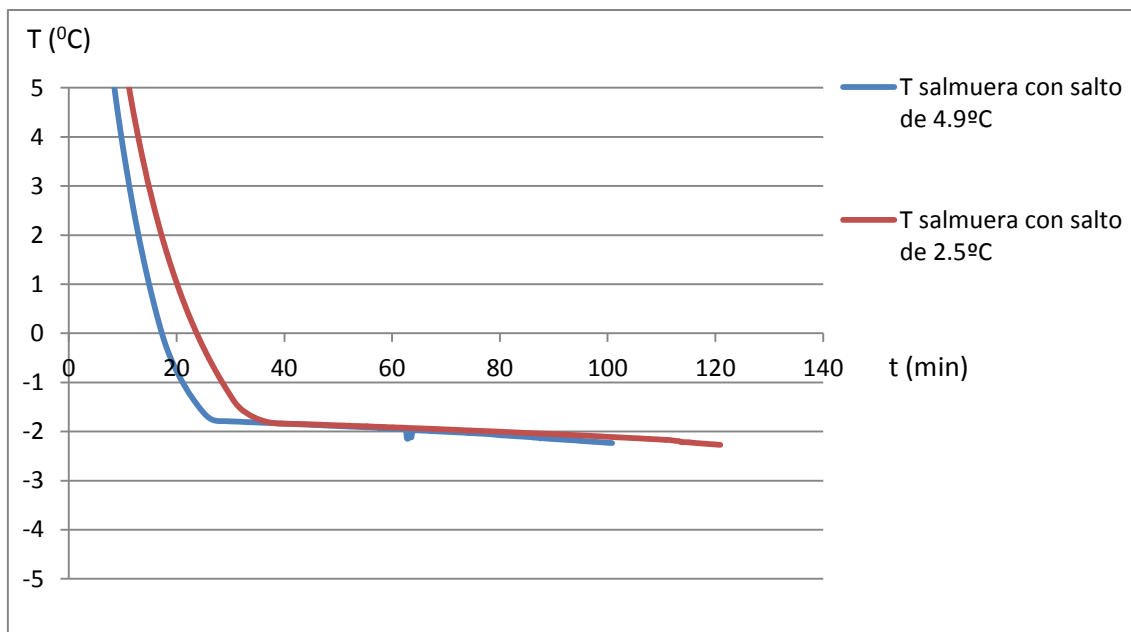


Figura 51: Efecto del salto de temperatura en la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo manteniendo constante el régimen de giro a 15 rpm y la concentración a 29.6 g/l

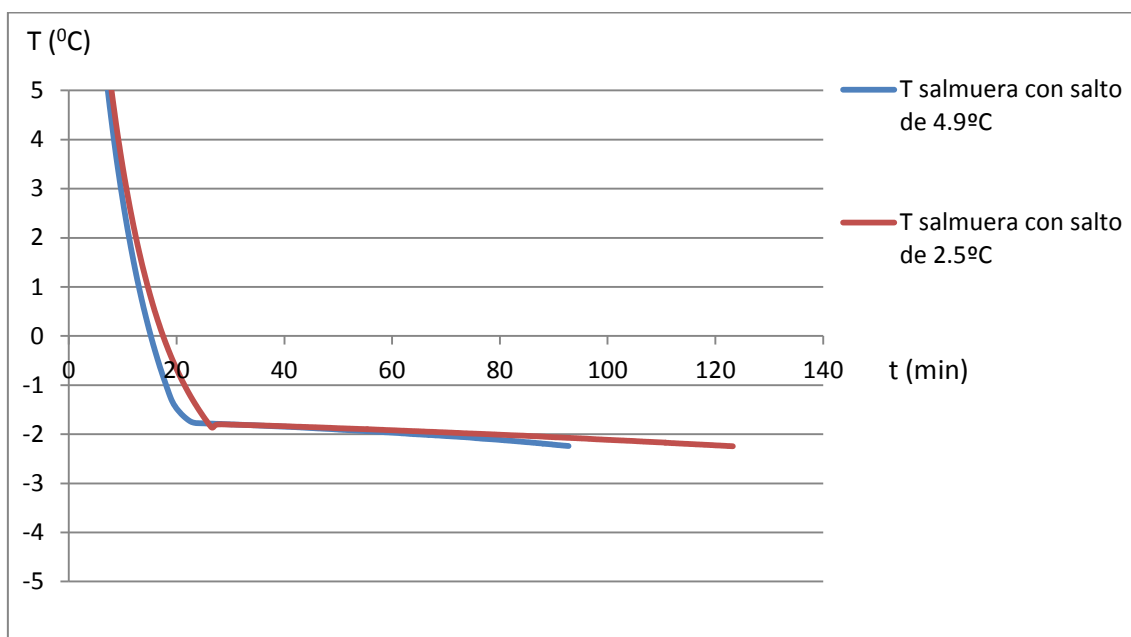


Figura 52: Efecto del salto de temperatura en la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo manteniendo constante el régimen de giro a 30 rpm y la concentración a 29.6 g/l

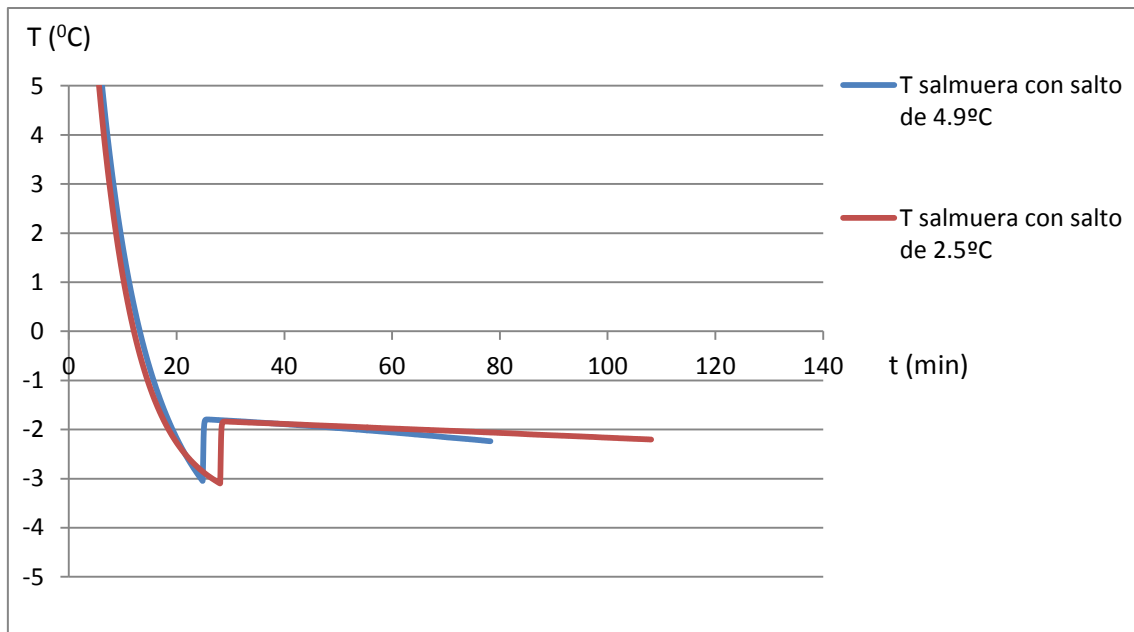


Figura 53: Efecto del salto de temperatura en la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo manteniendo constante el régimen de giro a 50 rpm y la concentración a 29.6 g/l

- El coeficiente de transmisión de calor  $h$  disminuye cuando el salto de temperatura aumenta.

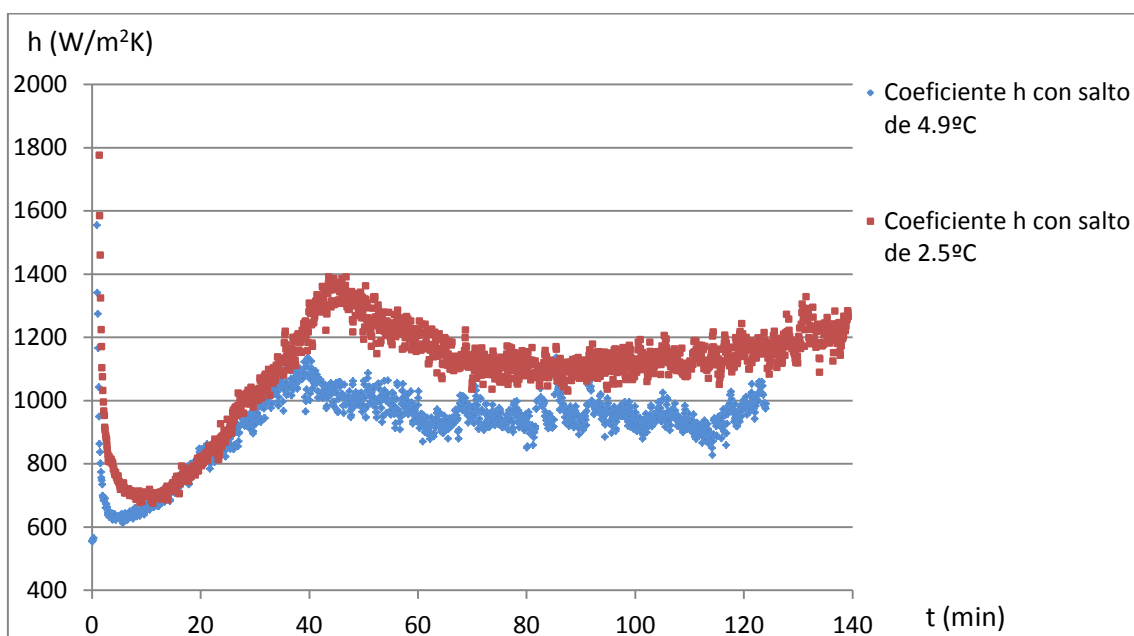


Figura 54: Efecto del salto de temperatura en el coeficiente de transmisión de calor manteniendo constante el régimen de giro a 5 rpm y la concentración a 29.6 g/l

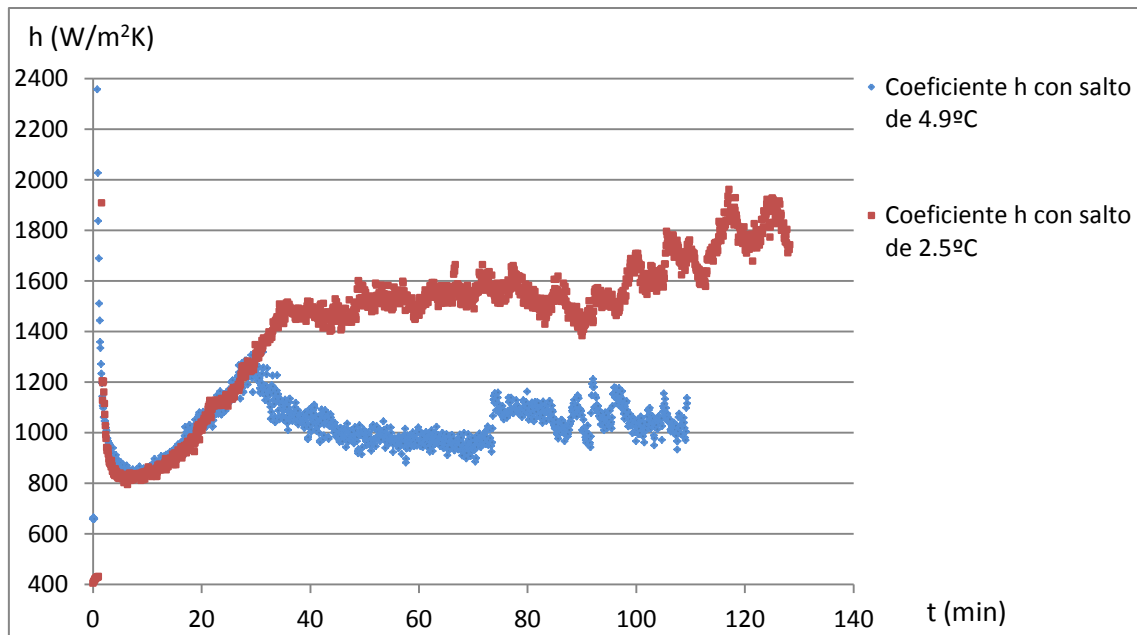


Figura 55: Efecto del salto de temperatura en el coeficiente de transmisión de calor manteniendo constante el régimen de giro a 10 rpm y la concentración a 29.6 g/l

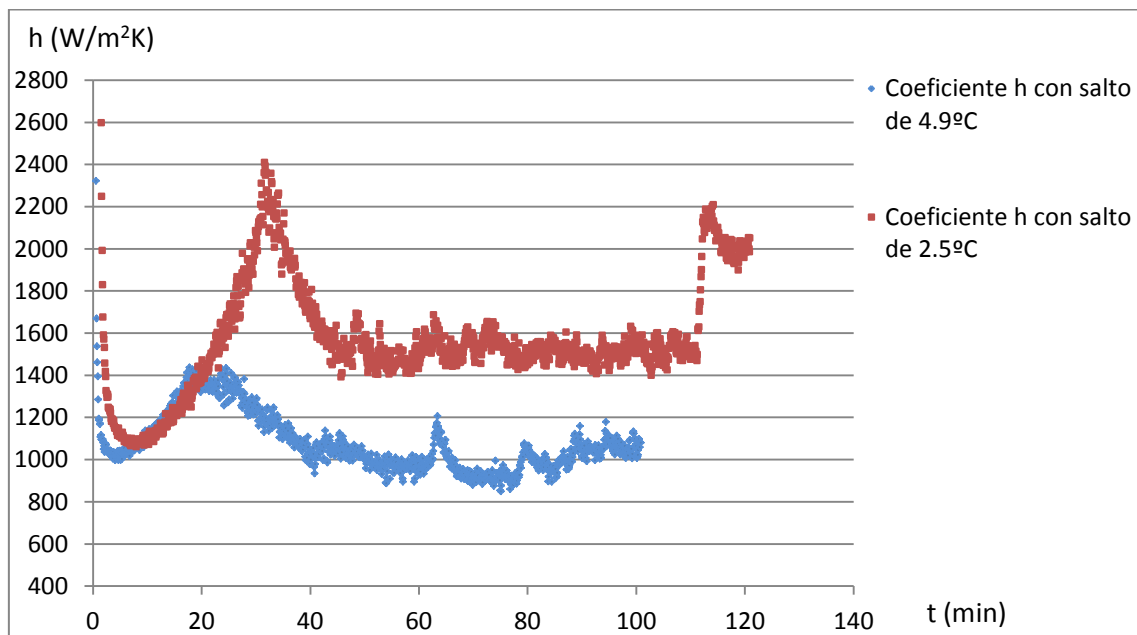


Figura 56: Efecto del salto de temperatura en el coeficiente de transmisión de calor manteniendo constante el régimen de giro a 15 rpm y la concentración a 29.6 g/l

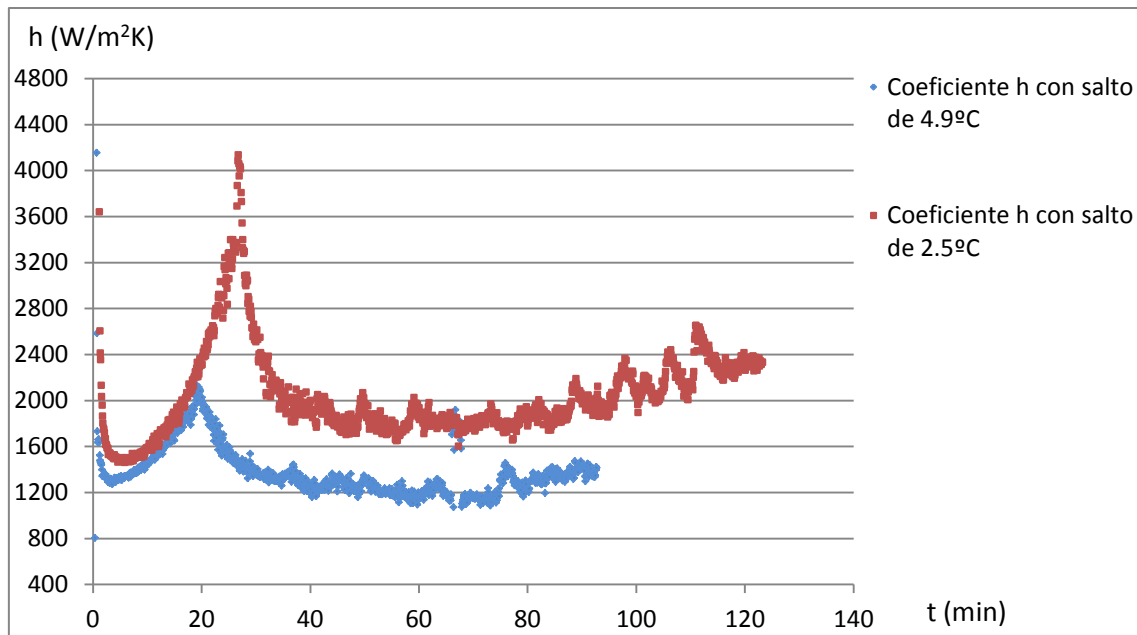


Figura 57: Efecto del salto de temperatura en el coeficiente de transmisión de calor manteniendo constante el régimen de giro a 30 rpm y la concentración a 29.6 g/l

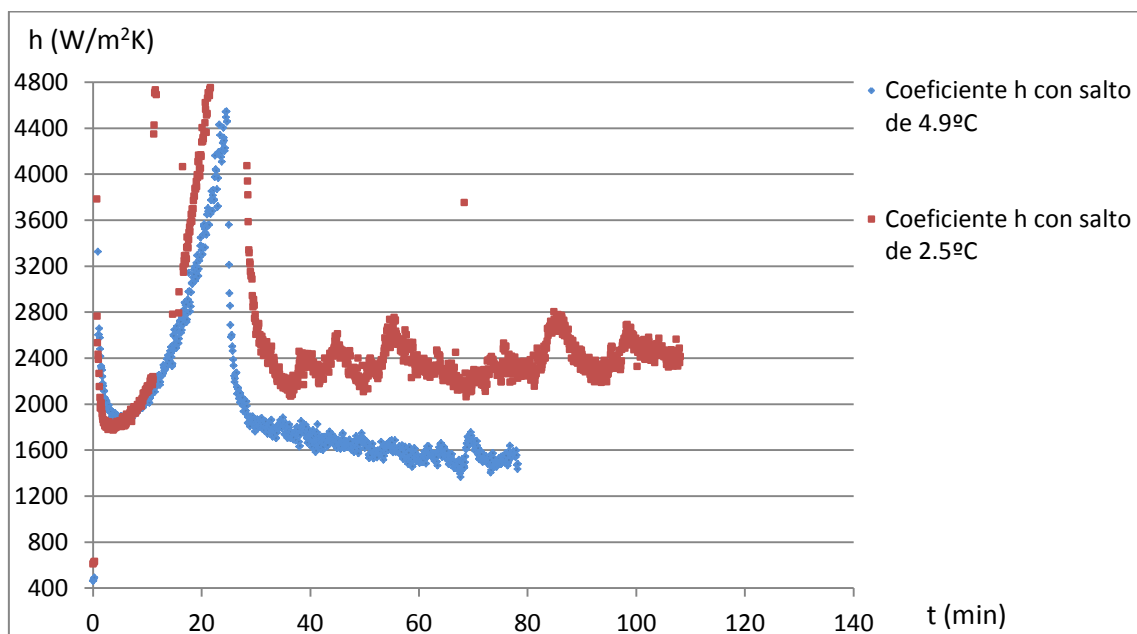


Figura 58: Efecto del salto de temperatura en el coeficiente de transmisión de calor manteniendo constante el régimen de giro a 50 rpm y la concentración a 29.6 g/l

- El número de Nusselt sufre las mismas variaciones que el coeficiente de transmisión de calor, un aumento del salto de temperatura genera una disminución del número de Nusselt.



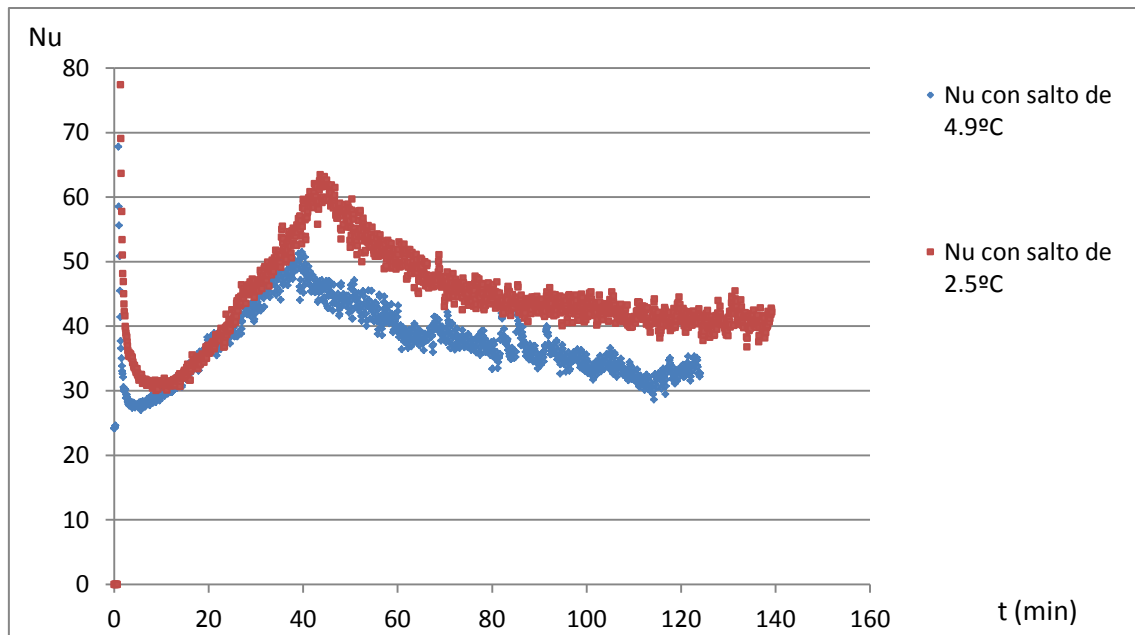


Figura 59: Efecto del salto de temperatura en el número de Nusselt manteniendo constante el régimen de giro a 5 rpm y la concentración a 29.6 g/l

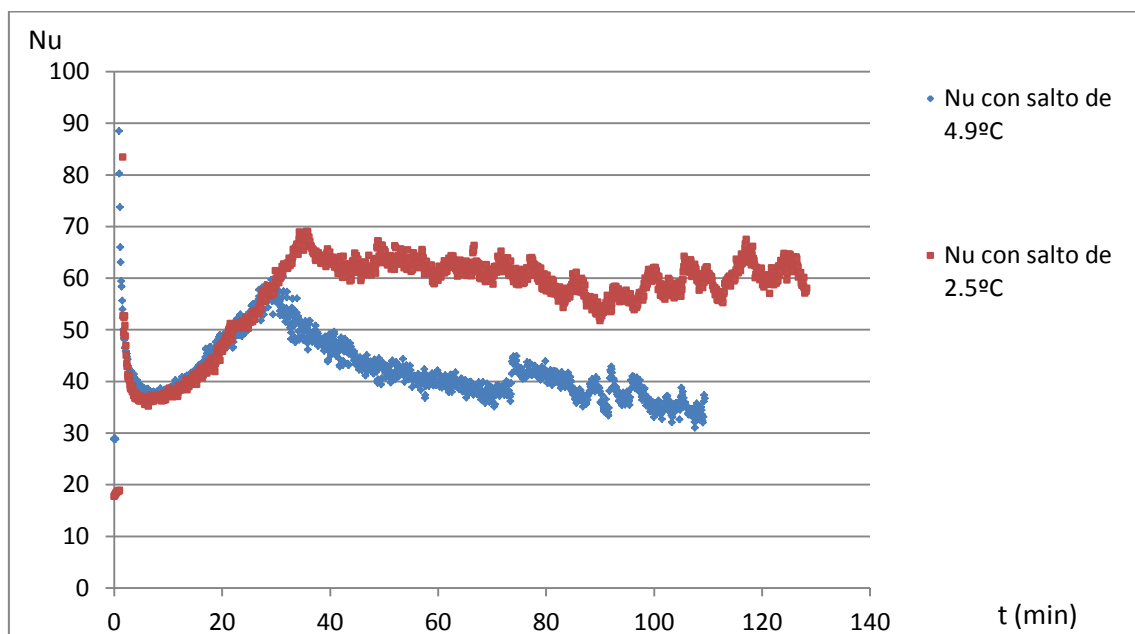


Figura 60: Efecto del salto de temperatura en el número de Nusselt manteniendo constante el régimen de giro a 10 rpm y la concentración a 29.6 g/l

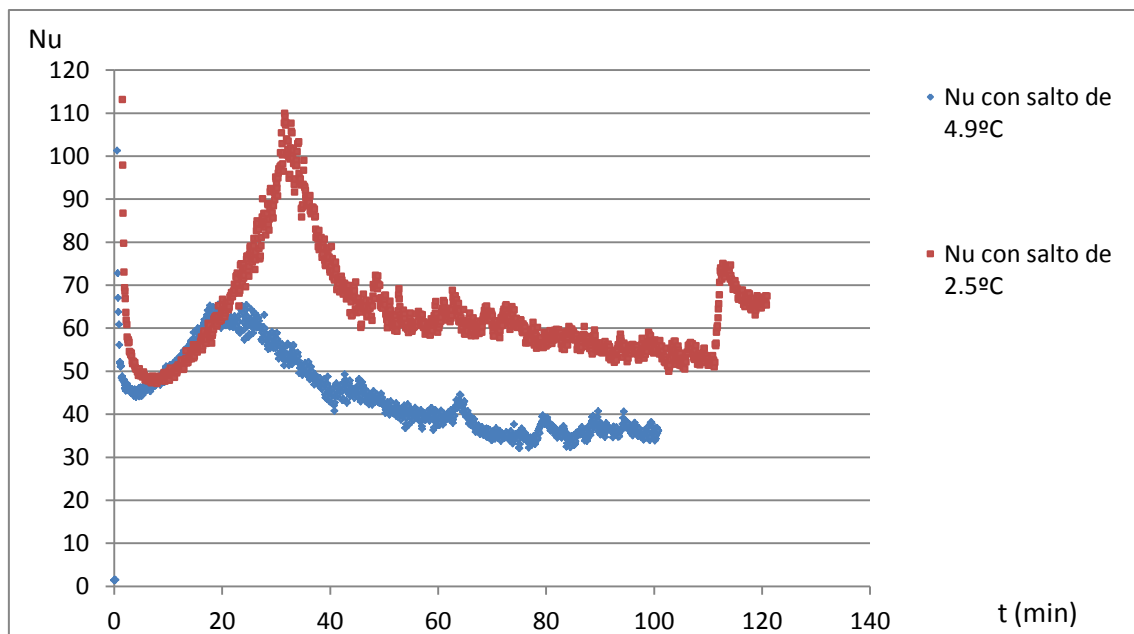


Figura 61: Efecto del salto de temperatura en el número de Nusselt manteniendo constante el régimen de giro a 15 rpm y la concentración a 29.6 g/l

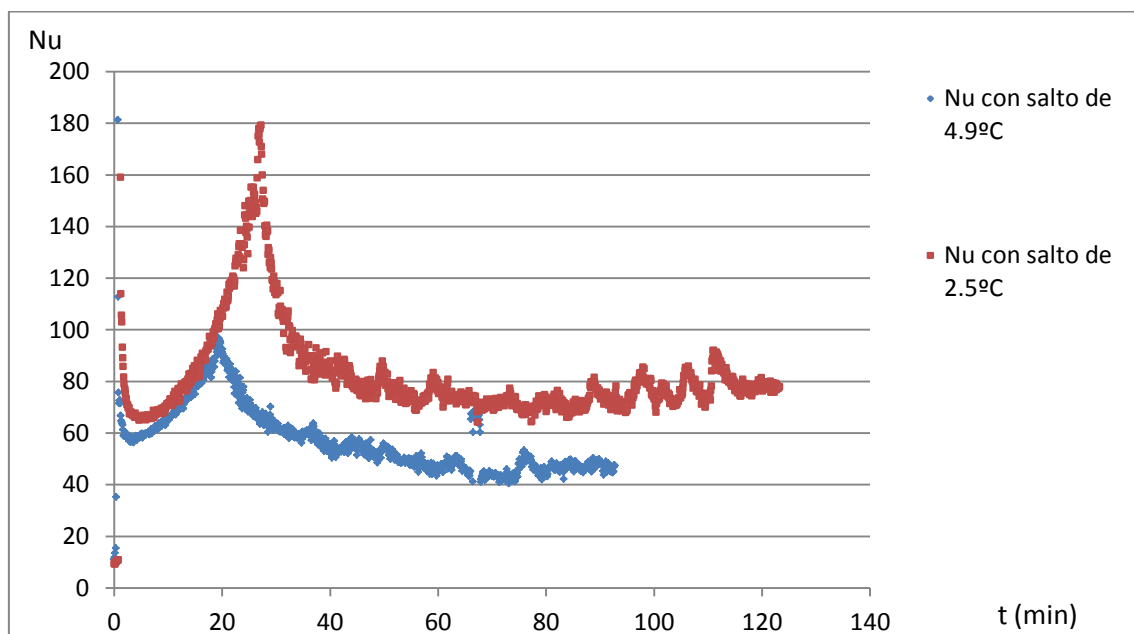


Figura 62: Efecto del salto de temperatura en el número de Nusselt manteniendo constante el régimen de giro a 30 rpm y la concentración a 29.6 g/l

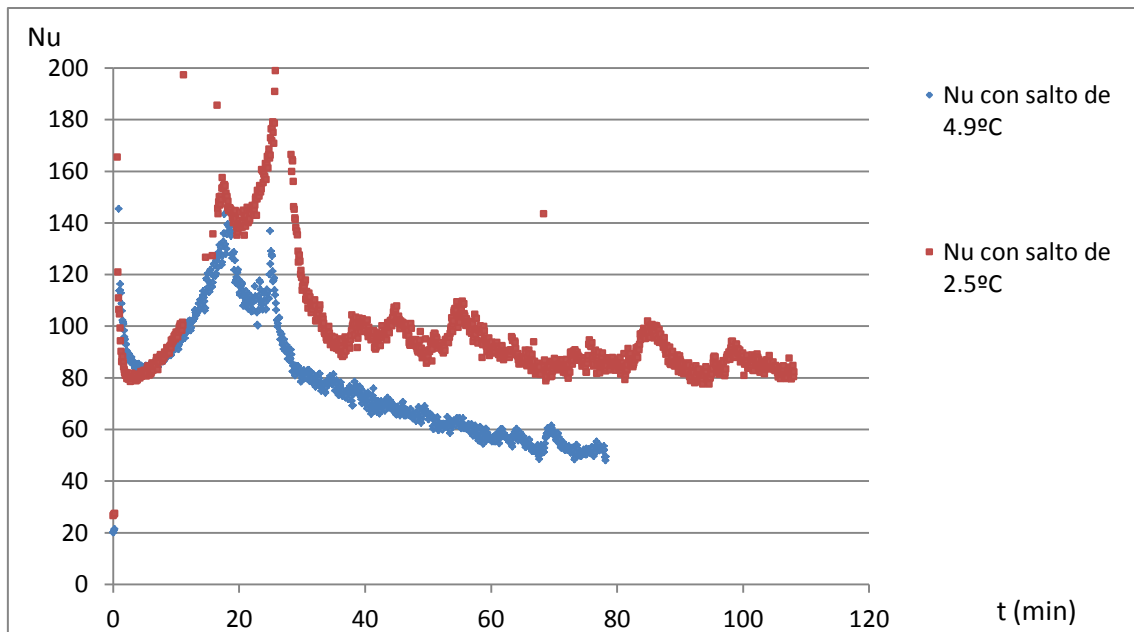


Figura 63: Efecto del salto de temperatura en el número de Nusselt manteniendo constante el régimen de giro a 50 rpm y la concentración a 29.6 g/l

- La potencia frigorífica que se obtiene de la instalación es mayor para saltos de temperatura mayores.

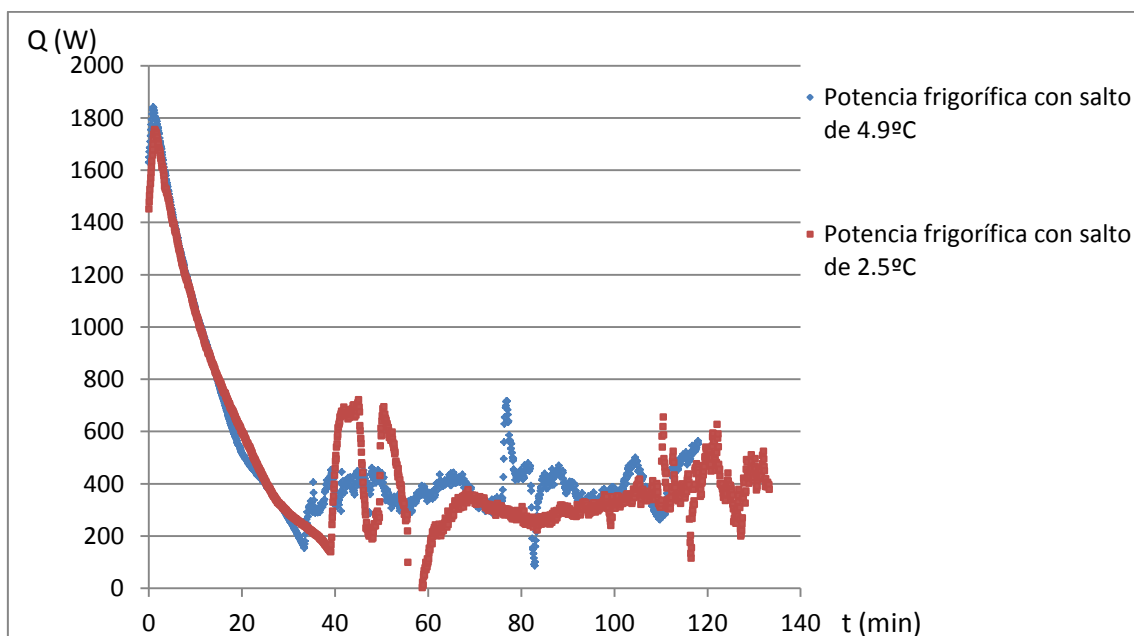


Figura 64: Efecto del salto de temperatura en la potencia frigorífica manteniendo constante el régimen de giro a 5 rpm y la concentración a 29.6 g/l

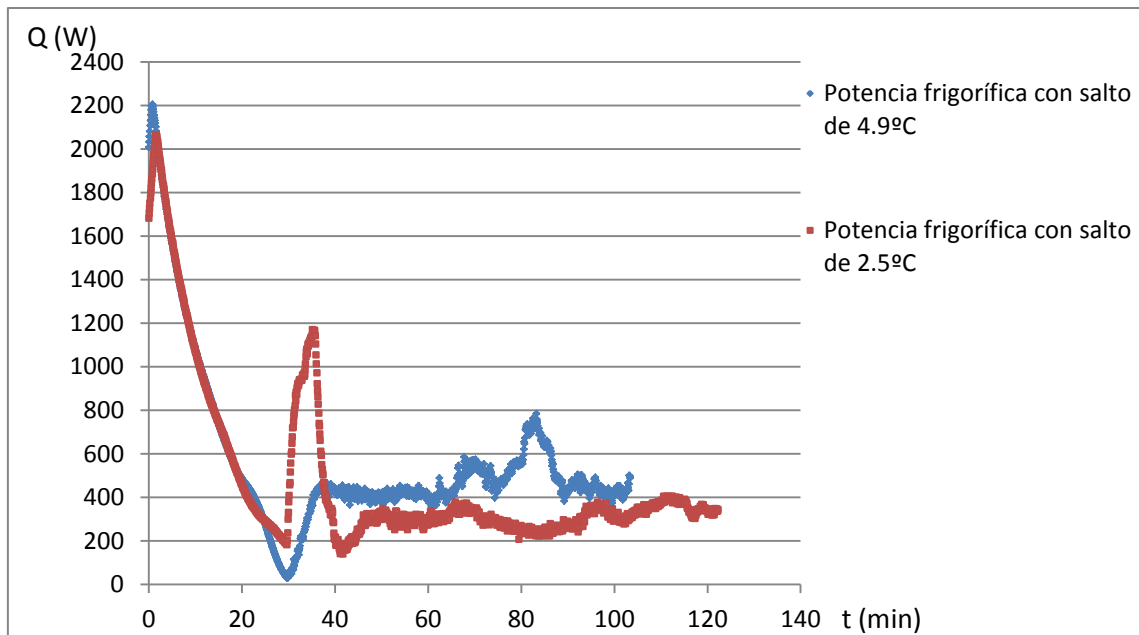


Figura 65: Efecto del salto de temperatura en la potencia frigorífica manteniendo constante el régimen de giro a 10 rpm y la concentración a 29.6 g/l

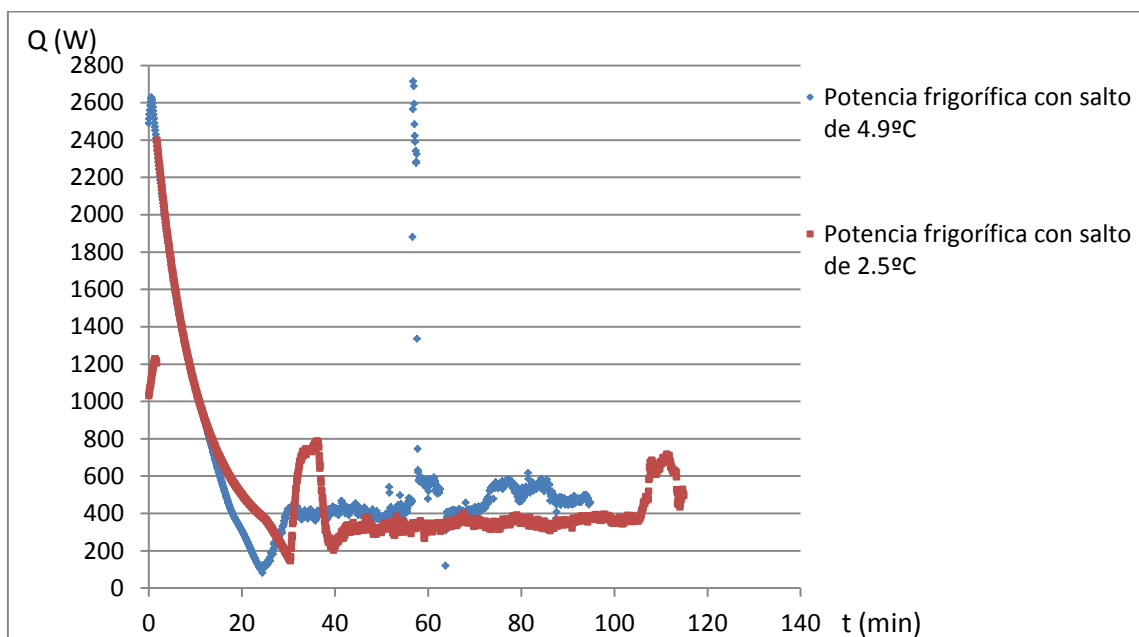


Figura 66: Efecto del salto de temperatura en la potencia frigorífica manteniendo constante el régimen de giro a 15 rpm y la concentración a 29.6 g/l

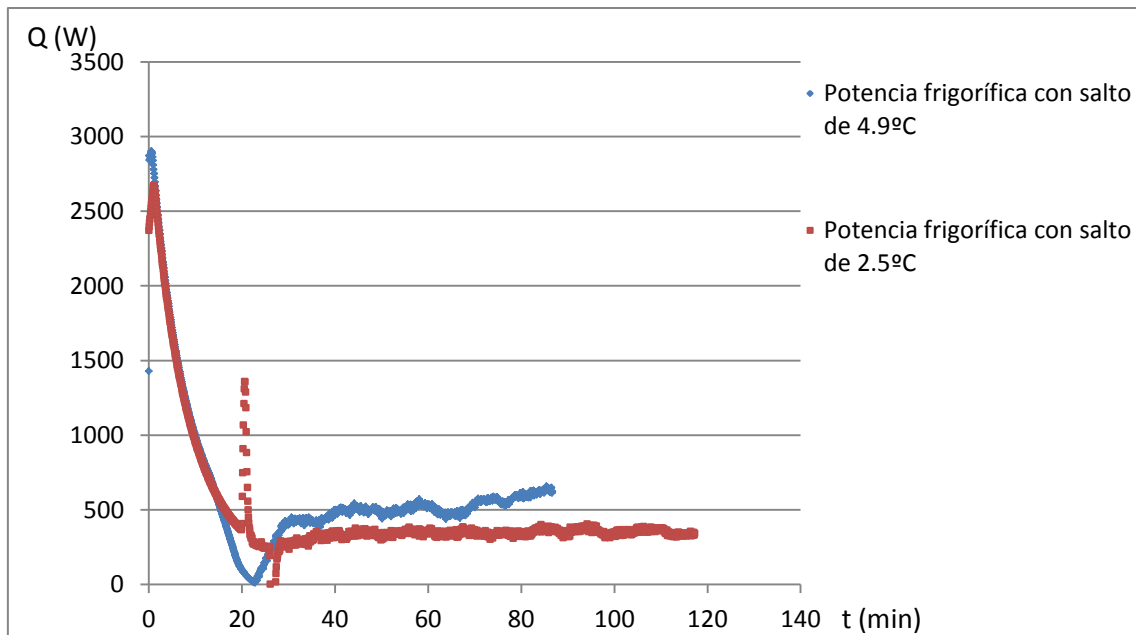


Figura 67: Efecto del salto de temperatura en la potencia frigorífica manteniendo constante el régimen de giro a 30 rpm y la concentración a 29.6 g/l

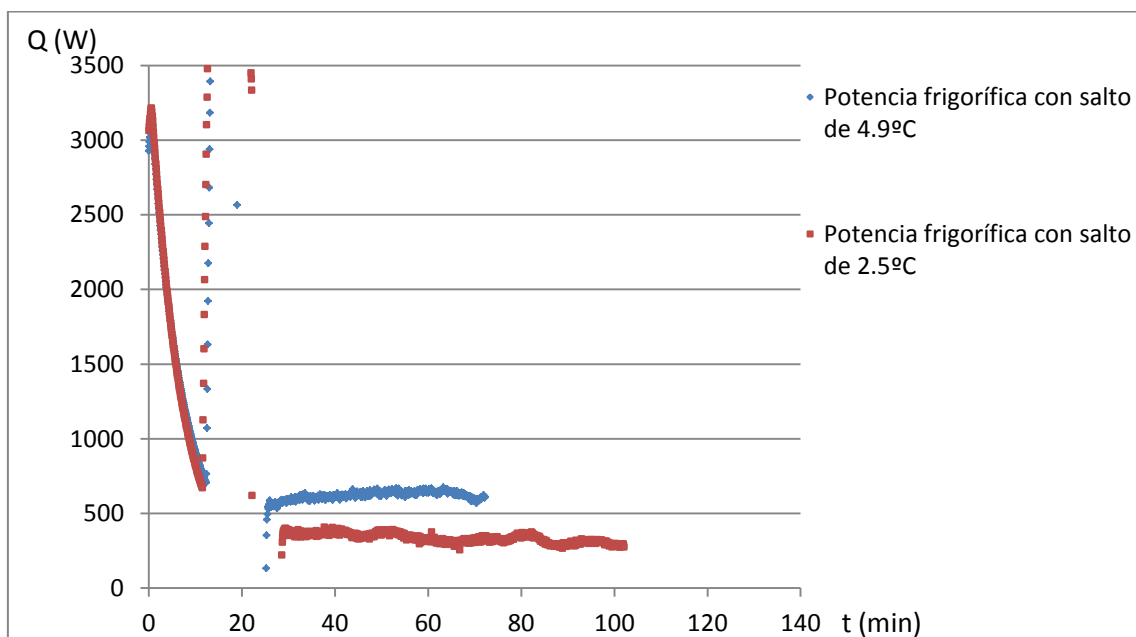


Figura 68: Efecto del salto de temperatura en la potencia frigorífica manteniendo constante el régimen de giro a 50 rpm y la concentración a 29.6 g/l

- Manteniendo igualmente constante el régimen de giro, el efecto que produce ahora una variación en la concentración inicial de la disolución se traduce en un proceso de enfriamiento más rápido cuando la concentración de partida es mayor.

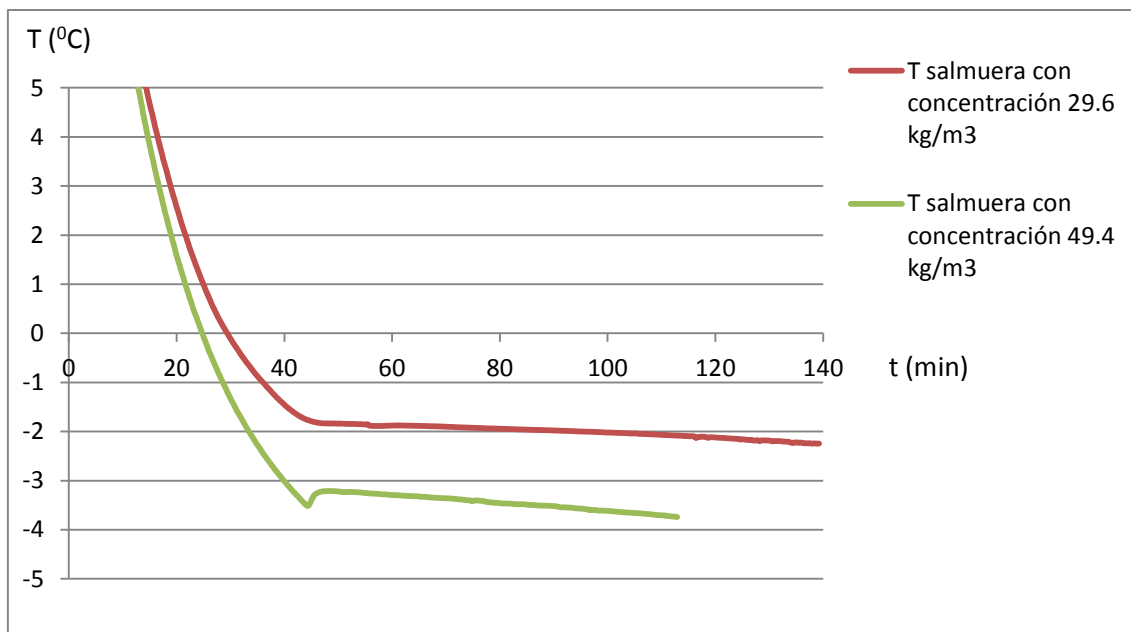


Figura 69: Efecto de la concentración en la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo manteniendo constante el régimen de giro a 5 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

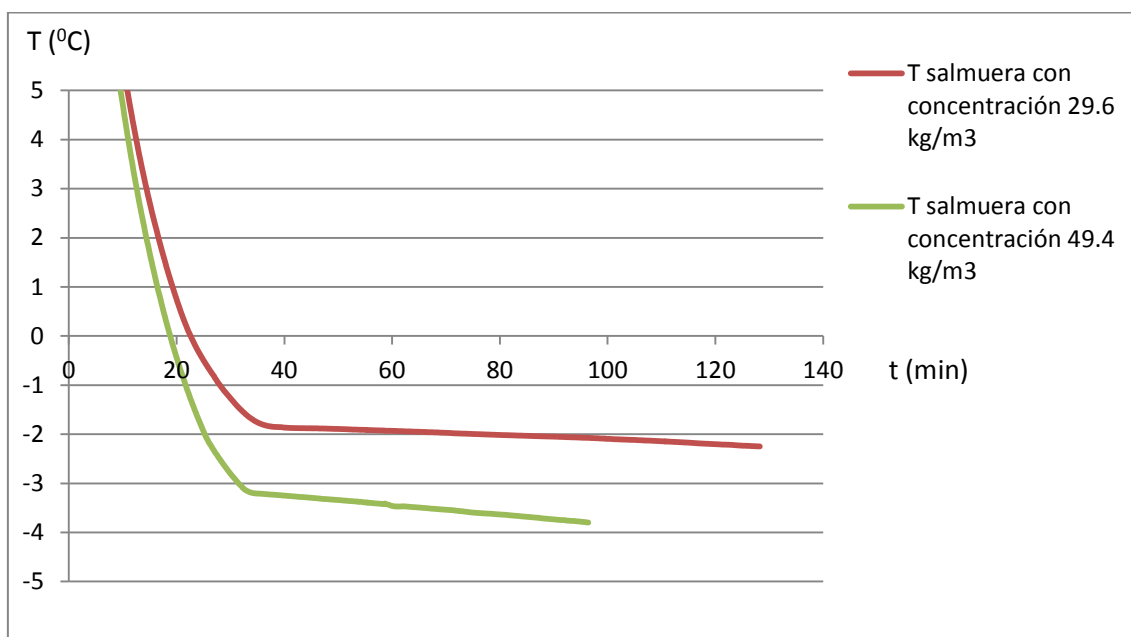


Figura 70: Efecto de la concentración en la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo manteniendo constante el régimen de giro a 10 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

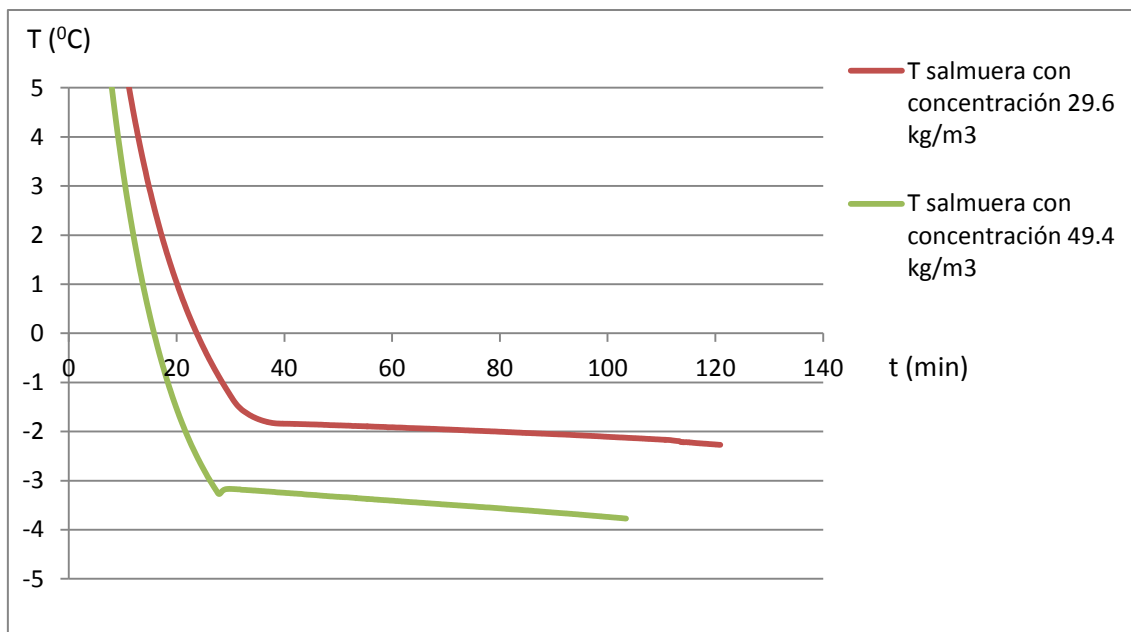


Figura 71: Efecto de la concentración en la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo manteniendo constante el régimen de giro a 15 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

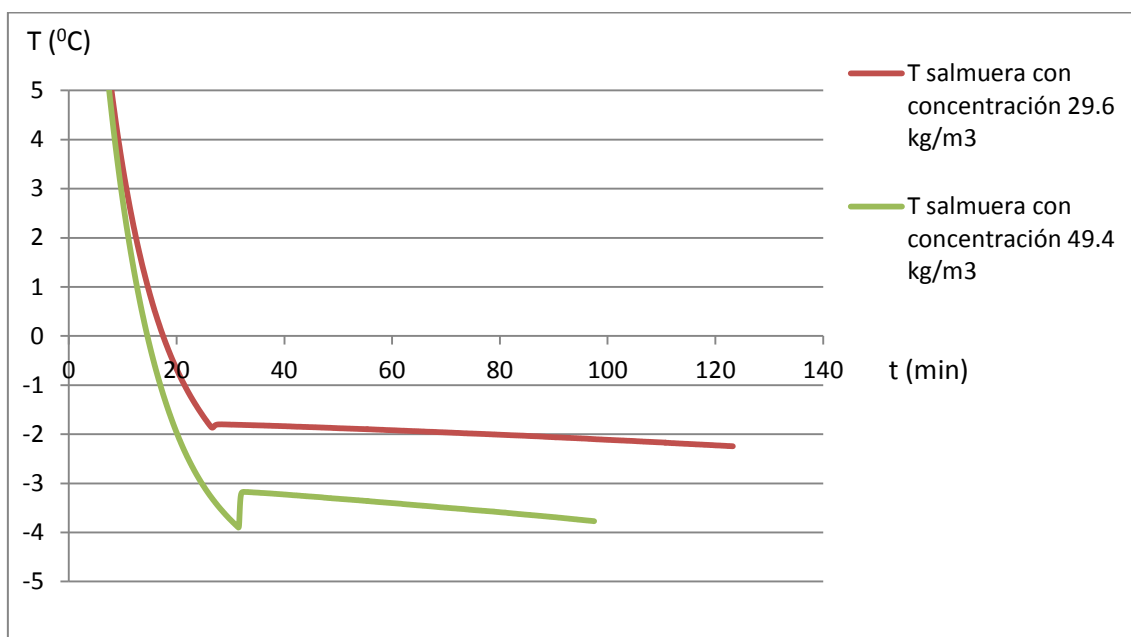


Figura 72: Efecto de la concentración en la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo manteniendo constante el régimen de giro a 30 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

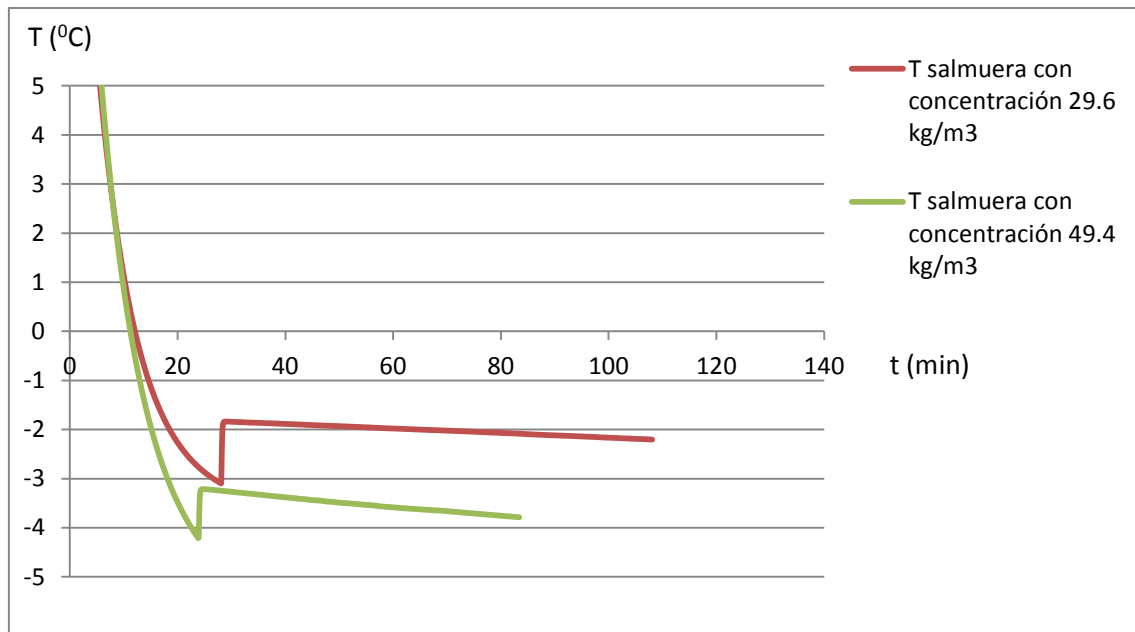


Figura 73: Efecto de la concentración en la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo manteniendo constante el régimen de giro a 50 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

- El coeficiente de transmisión de calor  $h$  disminuye cuando la concentración de la disolución es mayor. Los subenfriamientos producen aumentos en los coeficientes de transmisión a regímenes de giro mayores.

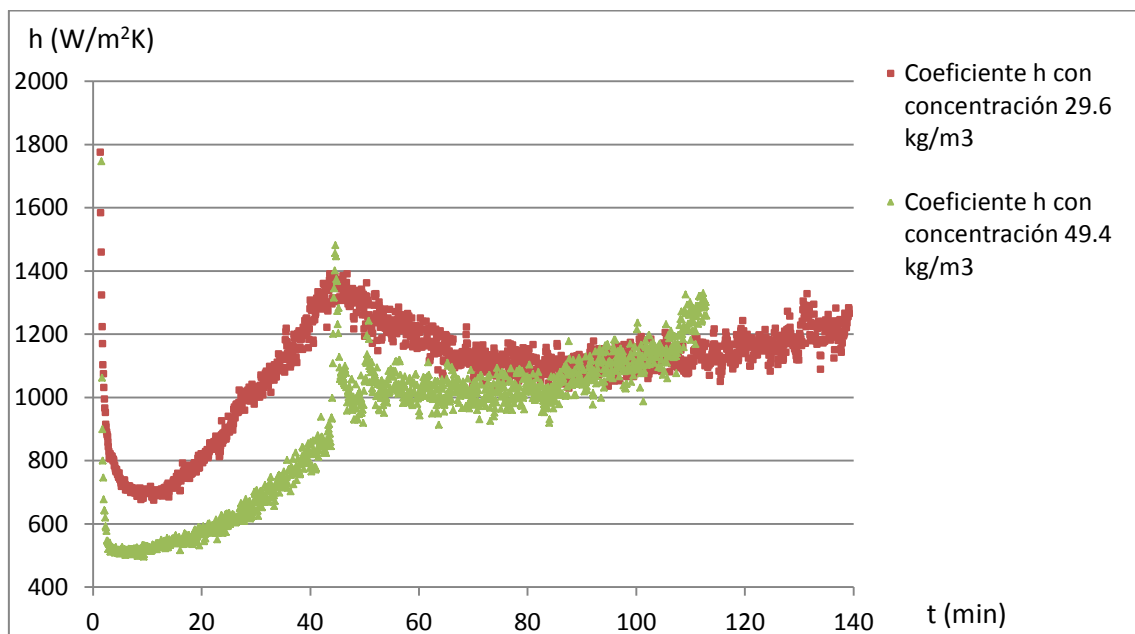


Figura 74: Efecto de la concentración en el coeficiente de transmisión de calor manteniendo constante el régimen de giro a 5 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C



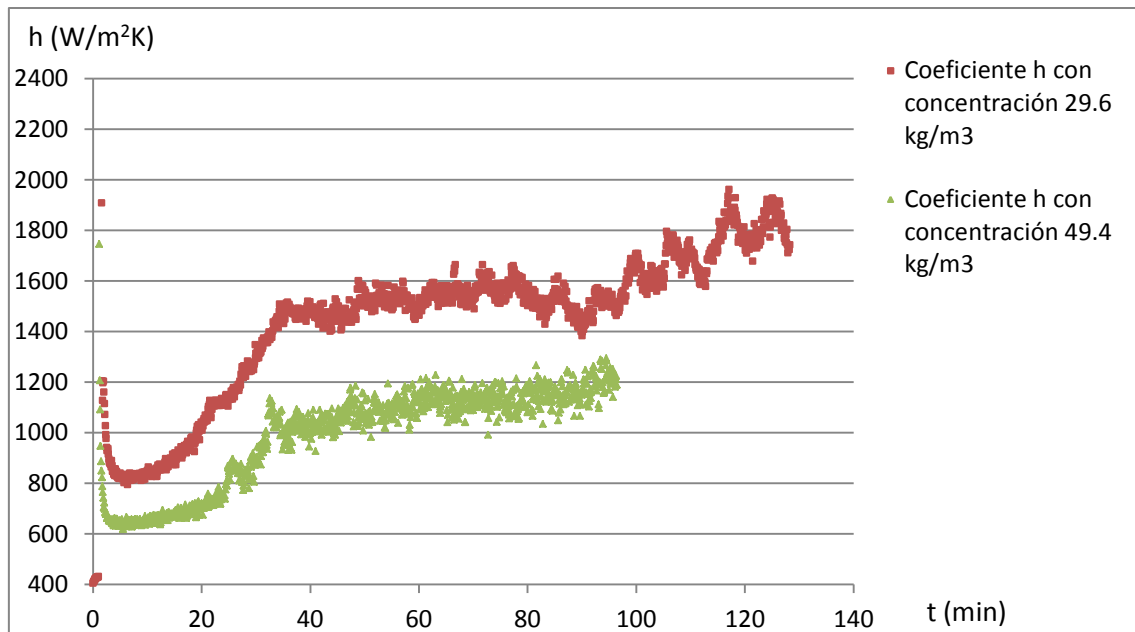


Figura 75: Efecto de la concentración en el coeficiente de transmisión de calor manteniendo constante el régimen de giro a 10 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

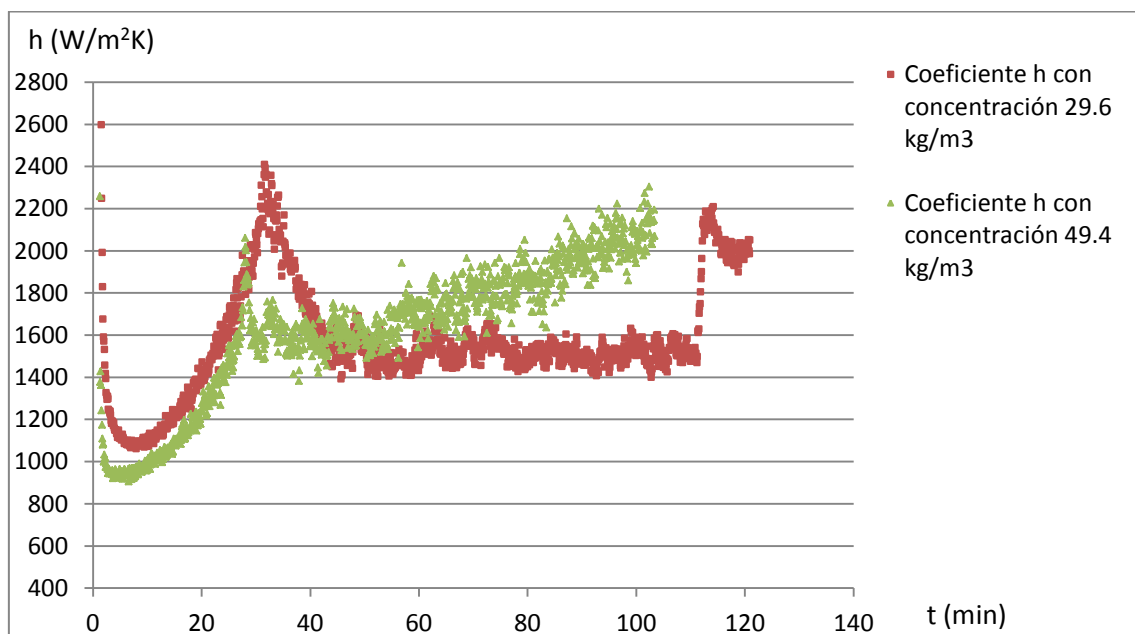


Figura 76: Efecto de la concentración en el coeficiente de transmisión de calor manteniendo constante el régimen de giro a 15 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

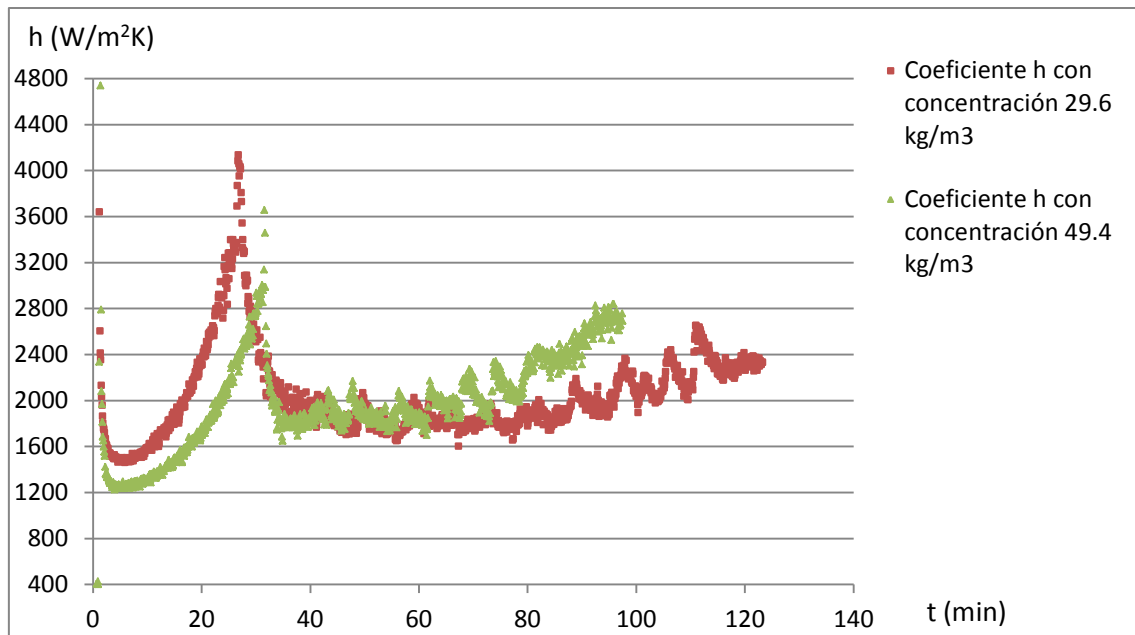


Figura 77: Efecto de la concentración en el coeficiente de transmisión de calor manteniendo constante el régimen de giro a 30 rpm y el salto de temperatura a  $2.5^\circ\text{C}$

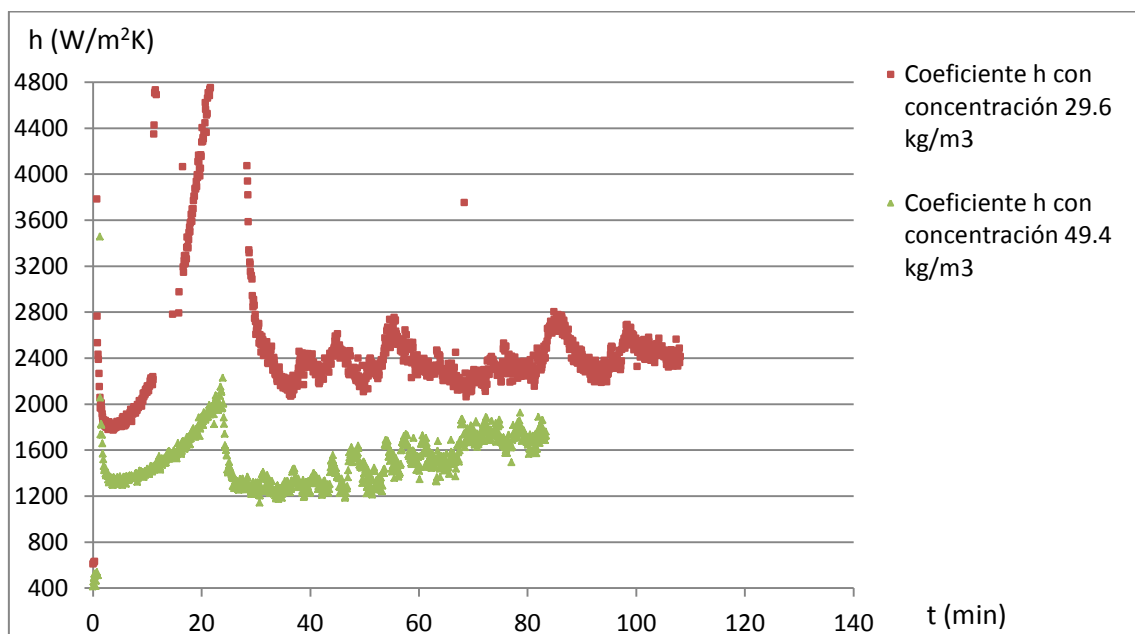


Figura 78: Efecto de la concentración en el coeficiente de transmisión de calor manteniendo constante el régimen de giro a 50 rpm y el salto de temperatura a  $2.5^\circ\text{C}$

- El número de Nusselt sufre las mismas variaciones que el coeficiente de transmisión de calor, un aumento de la concentración genera una disminución del número de Nusselt.

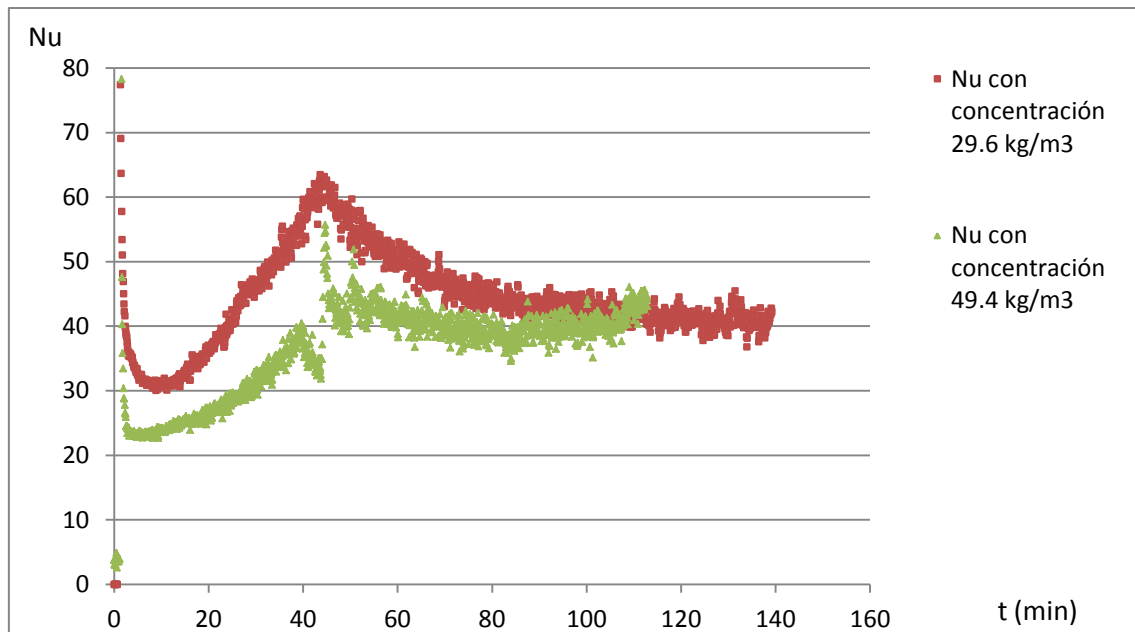


Figura 79: Efecto de la concentración en el número de Nusselt manteniendo constante el régimen de giro a 5 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

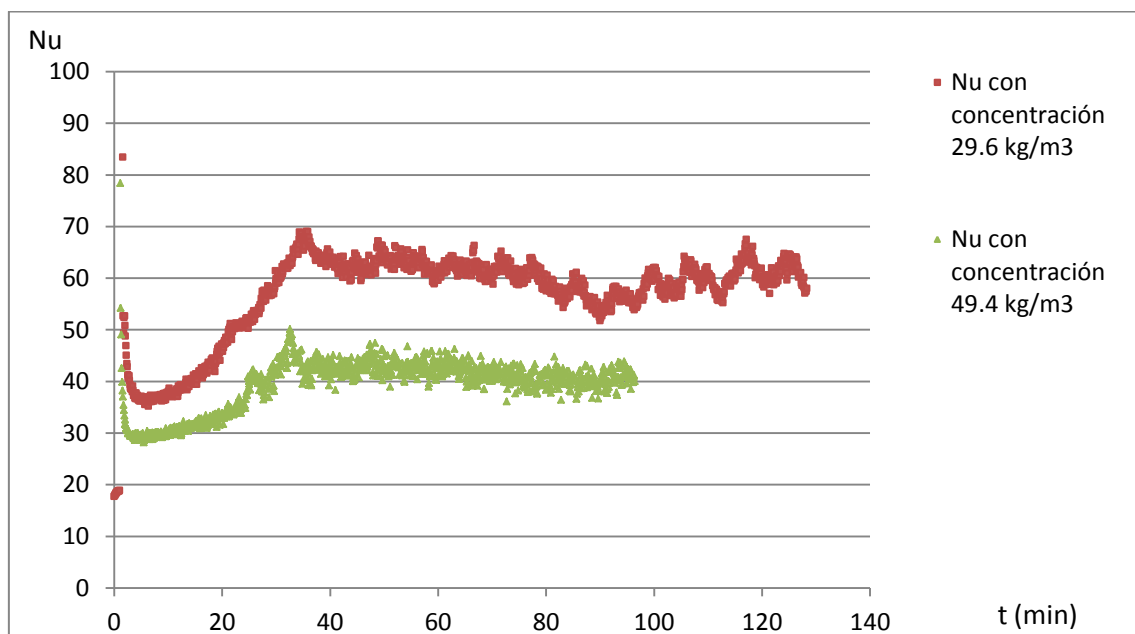


Figura 80: Efecto de la concentración en el número de Nusselt manteniendo constante el régimen de giro a 10 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

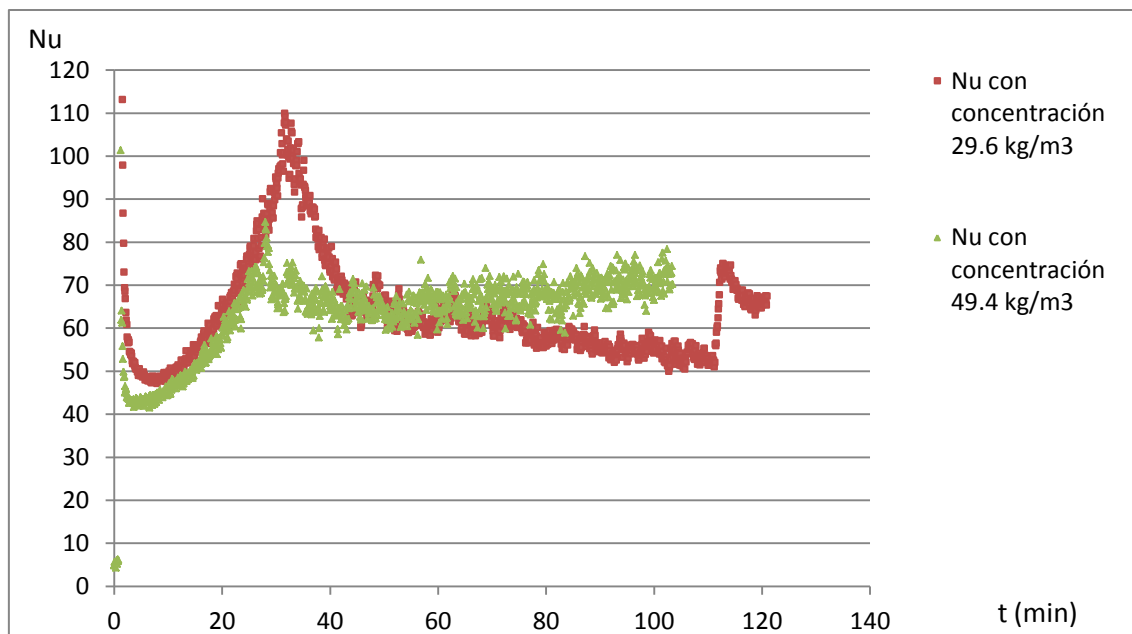


Figura 81: Efecto de la concentración en el número de Nusselt manteniendo constante el régimen de giro a 15 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

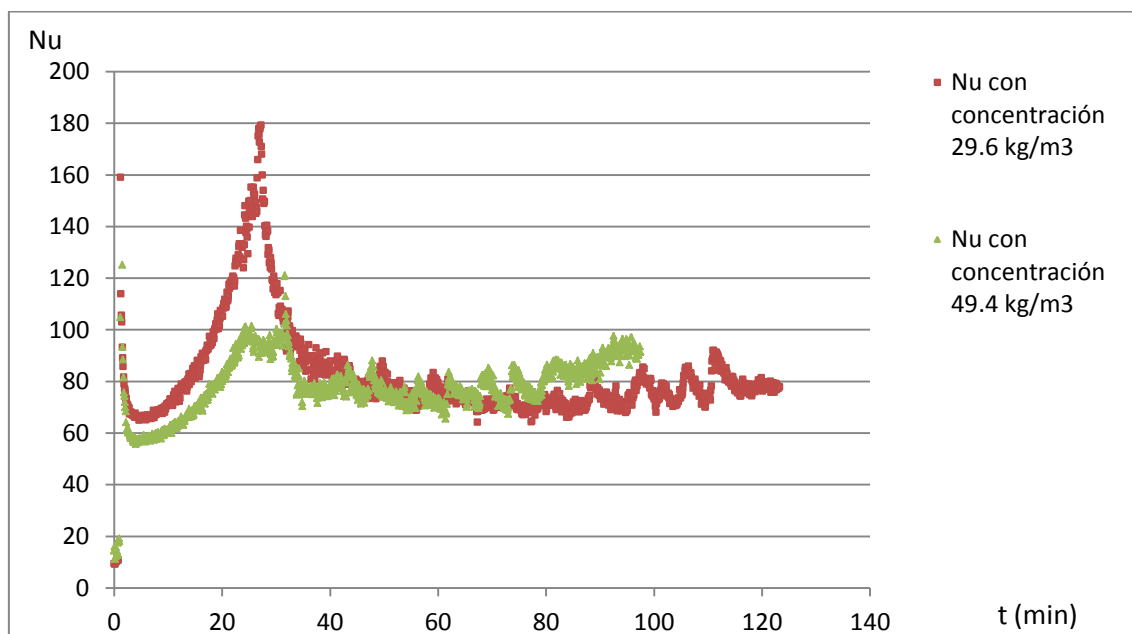


Figura 82: Efecto de la concentración en el número de Nusselt manteniendo constante el régimen de giro a 30 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

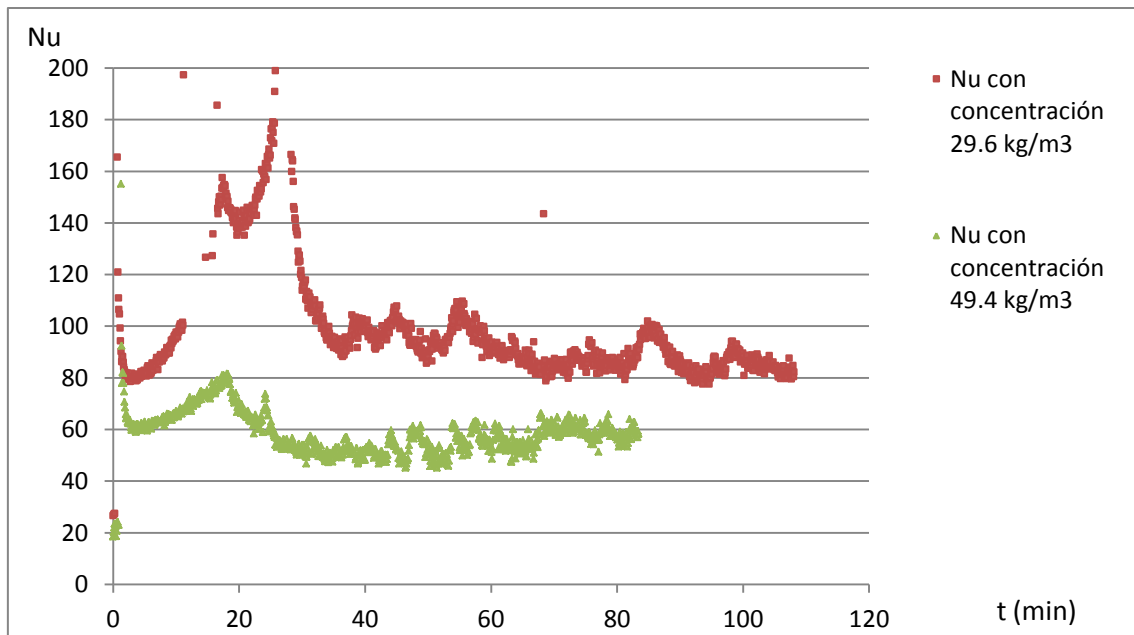


Figura 83: Efecto de la concentración en el número de Nusselt manteniendo constante el régimen de giro a 50 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

- La potencia frigorífica que se obtiene de la instalación es mayor para un aumento de concentración.

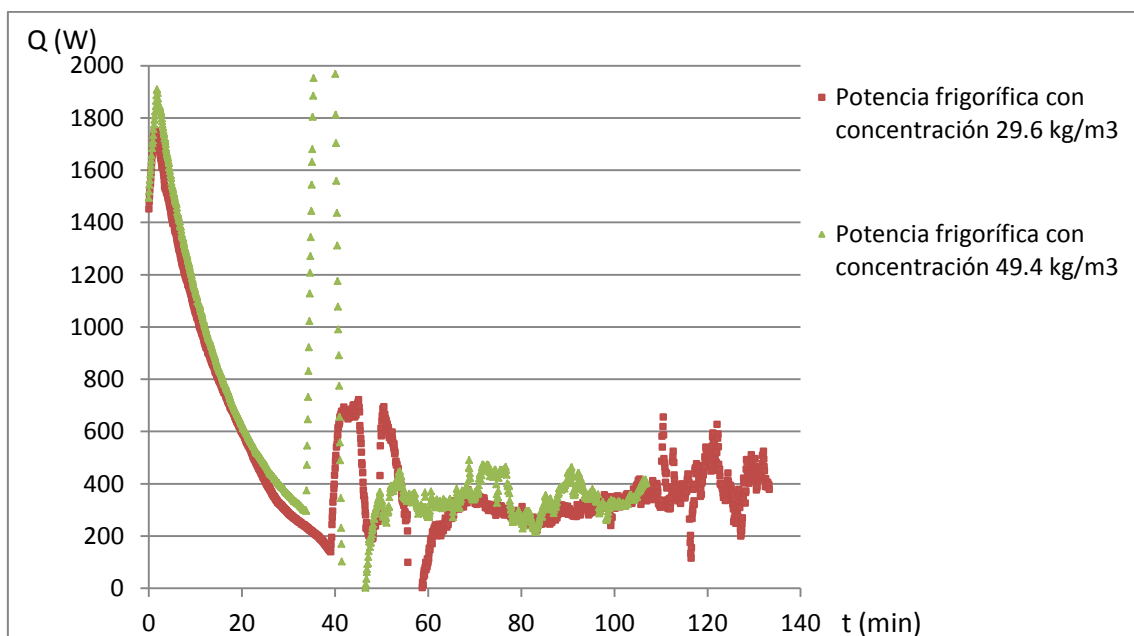


Figura 84: Efecto de la concentración en la potencia frigorífica manteniendo constante el régimen de giro a 5 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

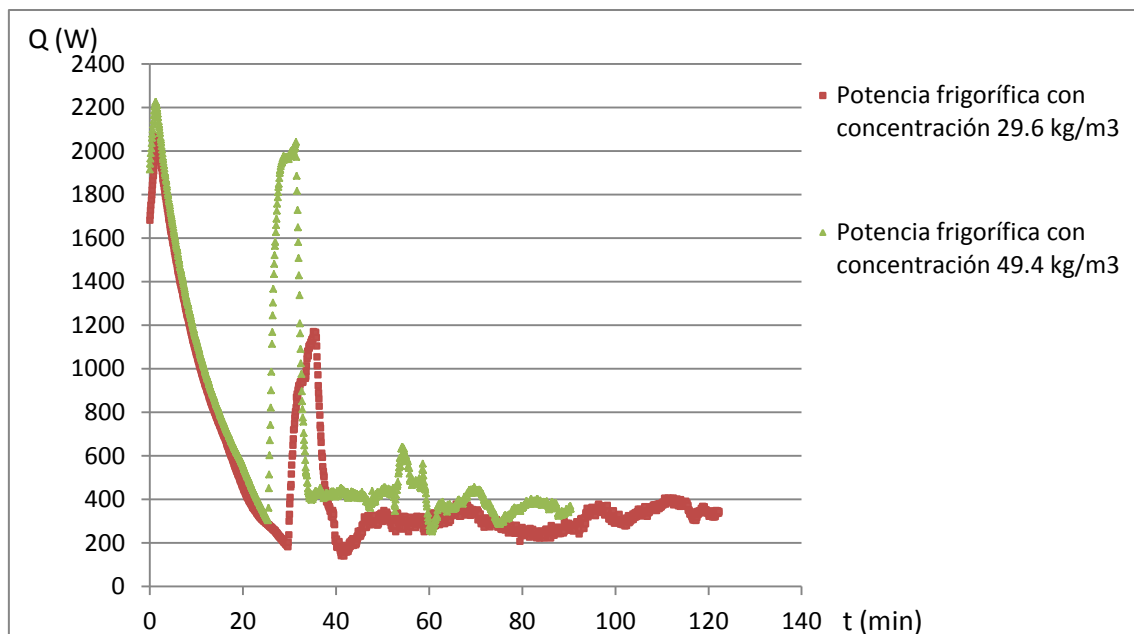


Figura 85: Efecto de la concentración en la potencia frigorífica manteniendo constante el régimen de giro a 10 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

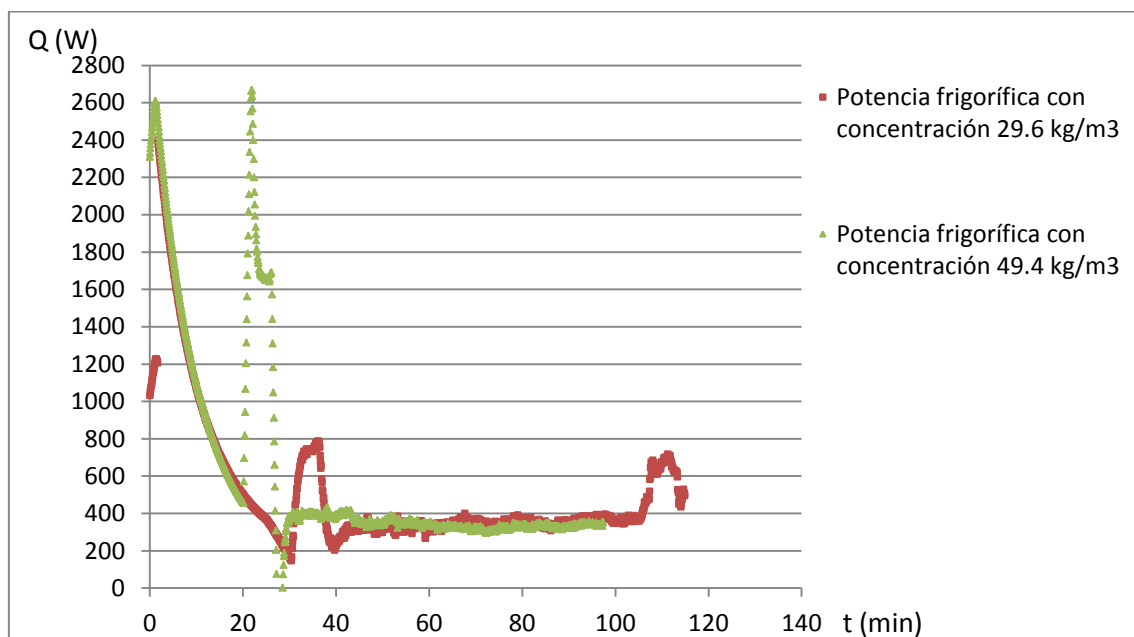


Figura 86: Efecto de la concentración en la potencia frigorífica manteniendo constante el régimen de giro a 15 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

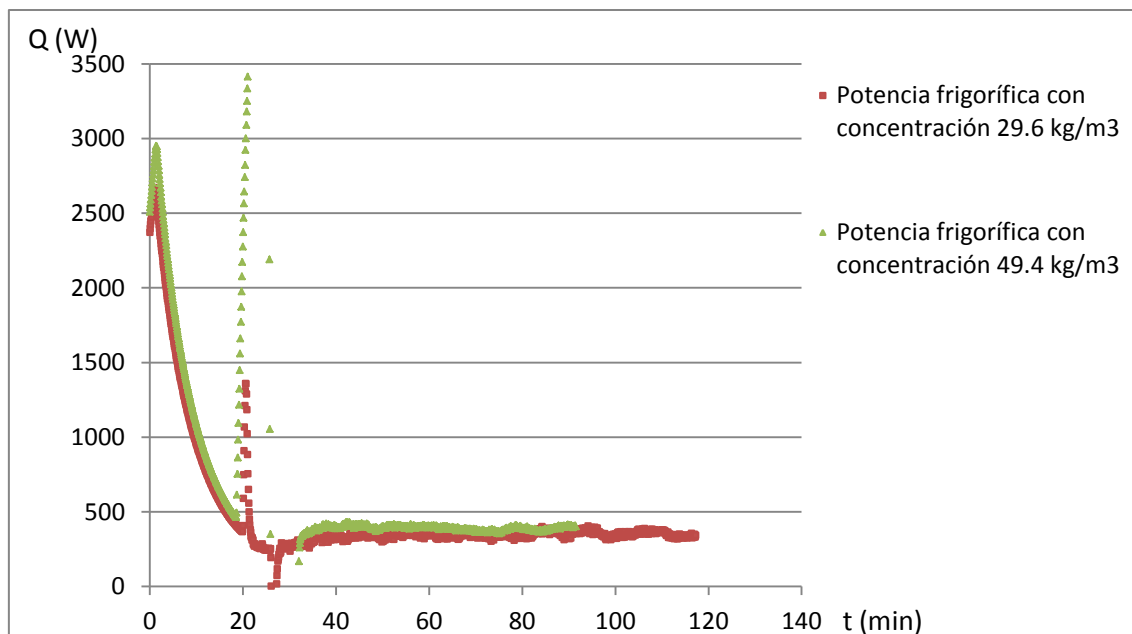


Figura 87: Efecto de la concentración en la potencia frigorífica manteniendo constante el régimen de giro a 30 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

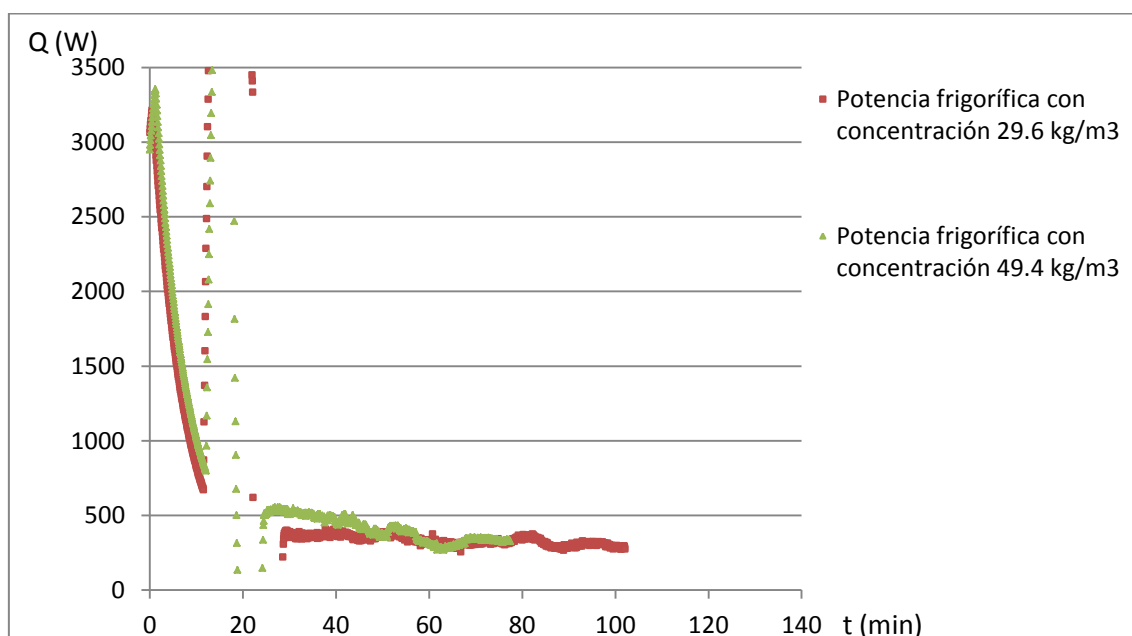


Figura 88: Efecto de la concentración en la potencia frigorífica manteniendo constante el régimen de giro a 50 rpm y el salto de temperatura a 2.5°C

## 5. Conclusiones

Una vez analizados y comparados los resultados obtenidos, las conclusiones a las que se llega, tanto desde el punto de vista del montaje y diseño como experimental, son:

- Los sensores de presión y de temperatura instalados en el circuito de refrigeración permiten conocer el comportamiento del refrigerante R507.
- El variador de frecuencia asociado al compresor, y el PID correspondiente, proporcionan las necesidades exigidas de temperatura en el tanque, y en el caso de más necesidad de carga térmica, las resistencias instaladas se ajustan a los niveles requeridos. Además, el aislamiento del tanque de amortiguación realizado favorece mantener dicha temperatura exigida.
- La calibración y el posterior montaje de los termopares en el cuerpo sólido del intercambiador de calor de placas generan una gran información del proceso que se realiza, ya que los 26 termopares instalados funcionan en su totalidad.
- El sistema de raspado, tanto motor, reductora y conjunto de palas con perfil angular, realiza un buen raspado salvo por el inconveniente de las irregularidades superficiales de la placa raspada, que permite la formación de una placa de hielo con espesor variable no raspada que empuja hacia arriba el eje de giro.
- El sistema de visualización, cámara, microscopio y ventana de metacrilato, permite observar en cualquier instante el estado del hielo líquido en el interior del intercambiador de calor de placas.

Las conclusiones experimentales son:

- Regímenes de giro altos provocan enfriamientos más rápidos, coeficientes de transmisión mayores, aumentos del número de Nusselt y potencias frigoríficas mayores. Se obtiene hasta un 111% en el aumento del coeficiente de transmisión del calor.
- Un salto de temperatura mayor produce enfriamientos más rápidos, coeficientes de transmisión menores, disminución del número de Nusselt y potencias frigoríficas más altas. La disminución del coeficiente de transmisión producida es de hasta un 48%.



- Un aumento de la concentración genera enfriamientos más rápidos, coeficientes de transmisión más bajos, una disminución en el número de Nusselt y potencias frigoríficas mayores o similares. La disminución obtenida del coeficiente de transmisión es de hasta un 37%.

## 6. Bibliografía

Las referencias consultadas para la elaboración de este Proyecto Final de Carrera han sido las siguientes:

- Tesis Doctoral realizada por D. Fernando Illán Gómez. Caracterización experimental del comportamiento termo-hidráulico del hielo líquido generado a partir de disoluciones de NaCl. Aplicación a cambiadores de calor.
- Proyecto Final de Carrera realizado por Andrés Sánchez Alcaraz. Diseño, montaje y puesta a punto de una instalación para la fabricación de hielo líquido mediante intercambiadores de superficie rascada rotativos.
- [http://www.dolzhnos.com.ar/htm/densidad\\_del\\_aire.htm](http://www.dolzhnos.com.ar/htm/densidad_del_aire.htm)
- [http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Arquitectura\\_Sostenible/Clima/Calculo\\_Punto\\_Rocio.asp](http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Arquitectura_Sostenible/Clima/Calculo_Punto_Rocio.asp)
- <http://jonam.co.in/scrapped-surface-heat-exchanger-t-sensation/>
- <http://www.hrs-heatexchangers.com/es/productos/componentes/intercambiadores-de-calor-de-superficie-rascada/hrs-serie-unicus/default.aspx>
- <http://www.alfalaval.com/solution-finder/products/contherm-scraped-surface-heat-exchanger-sshe/Documents/Contherm%20Scraped-Surface%20Heat%20Exchanger.pdf>
- [http://www.spx.com/en/assets/pdf/pe-1530\\_votsshe\\_wcb.pdf](http://www.spx.com/en/assets/pdf/pe-1530_votsshe_wcb.pdf)
- <http://hielo-liquido.blogspot.com.es/>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Intercambiador\\_de\\_calor\\_din%C3%A1mico\\_de\\_superficie\\_rascada](http://es.wikipedia.org/wiki/Intercambiador_de_calor_din%C3%A1mico_de_superficie_rascada)
- <http://www.kinarca.com/fichas/hieloliquido.pdf>
- [http://www.sunwell.com/sp\\_suntech1.htm](http://www.sunwell.com/sp_suntech1.htm)
- Handbook of heat transfer de Warren M. Rohsenow, James P. Hartnett, Young I. Cho. Editorial McGraw-Hill.
- Capítulo 21 Physical Properties of Secondary Coolants (Brines)
- <http://www.esmijovi.com/wp-content/uploads/2009/03/r507-fichas-seguridad.pdf>

## **Anexo 1: Manipulación y seguridad de las disoluciones**

### **Cloruro de calcio**

#### **Manipulación y almacenamiento.**

- Manipulación: Sin indicaciones particulares.
- Almacenamiento: Recipientes bien cerrados. Ambiente seco. Temperatura ambiente.

#### **Controles de exposición/protección personal.**

- Medidas técnicas de protección: No procede
- Control límite de exposición: No procede
- Protección respiratoria: En caso de formarse vapores, usar equipo respiratorio adecuado.
- Protección de las manos: Usar guantes apropiados.
- Protección de los ojos: Usar gafas apropiadas.
- Medidas de higiene particulares: Quitarse las ropas contaminadas Usar ropa de trabajo adecuada. Lavarse las manos antes de las pausas y al finalizar el trabajo.
- Controles de la exposición del medio ambiente: Cumplir con la legislación local vigente sobre protección del medio ambiente. El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y, cuando proceda, el tiempo de penetración de dicho material, en relación con la cantidad y la duración de la exposición.

## **Cloruro de sodio**

### **Manipulación y almacenamiento.**

- Manipulación: Sin indicaciones particulares.
- Almacenamiento: Recipientes bien cerrados.

### **Controles de exposición / protección personal.**

- Medidas técnicas de protección: No procede.
- Control límite de exposición: No procede.
- Protección respiratoria: No procede.
- Protección de las manos: Usar guantes apropiados.
- Protección de los ojos: Usar gafas apropiadas.
- Medidas de higiene particulares: Quitarse las ropas contaminadas. Usar ropa de trabajo adecuada. Lavarse las manos antes de las pausas y al finalizar el trabajo.
- Controles de la exposición del medio ambiente: Cumplir con la legislación local vigente sobre la protección del medio ambiente. El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y, cuando proceda, el tiempo de penetración de dicho material, en relación con la cantidad y la duración de la exposición.

## **Anexo 2: Manipulación y seguridad del refrigerante**

### **Manipulación y almacenamiento.**

- Manipulación: Consignas aplicables a los productos gases licuados a presión. Prever una extracción apropiada en la instalación. Prever en la proximidad un equipo autónomo de respiración. Prohibir puntos de ignición y el contacto con superficies calientes. No fumar.
- Almacenamiento: Manténgase en un lugar fresco y bien ventilado. Almacénese a temperatura ambiente en el envase original. Manténgase separado del calor y de las fuentes de ignición. Proteger los envases llenos de fuentes de calor, para evitar sobrepresiones.

### **Controles de exposición/protección personal.**

- Medidas técnicas de protección: Prever la renovación de aire y/o de extracción en los lugares de trabajo.
- Control límite de exposición: Sin valor límite.
- Protección respiratoria: En caso de ventilación insuficiente, úsese equipo de respiración adecuado.
- Protección de las manos: Usar guantes.
- Protección de los ojos: Usar gafas de seguridad.
- Medidas de higiene específicas: Evítese el contacto con la piel, los ojos y la inhalación de los vapores. No fumar.

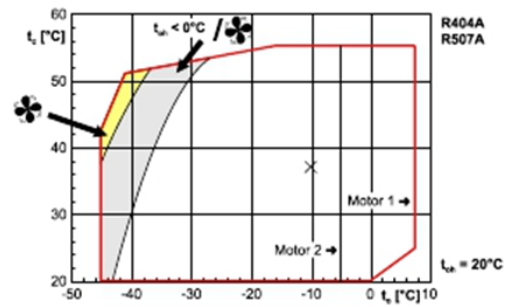
## Anexo 3: Hoja de características de la unidad condensadora


### Valores de entrada

Potencia frigorífica	3kW
Serie	Temp. ambiente alta
Refrigerante	R507A
Temperatura de referencia	Temp. en el punto de rocío
Temp. de evaporación	-10°C
Temperatura ambiente	27°C
Recalentamiento de gas aspirado	10K
Alimentación eléctrica	400V-3-50Hz
Recalentamiento útil	5.00K
Regulador de capacidad	100%

L

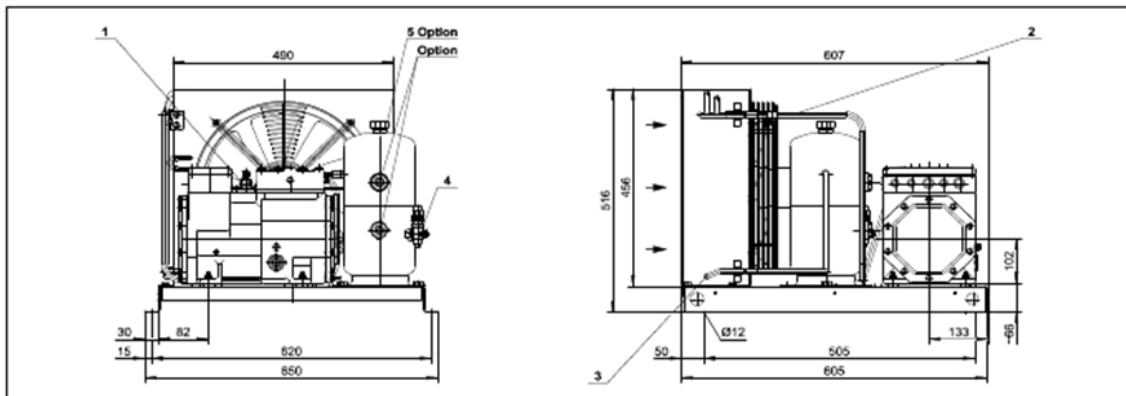
### Límites de aplicación



 Version 5.3.2	Unidad condensadora  06/09/2012 / Todos los datos son susceptibles de cambio
--	--


Datos técnicos: LH44/2HC-1.2Y-40 S

### Dimensiones y conexiones



## Datos técnicos

Peso	80 kg
Anchura total	650 mm
Profundidad total	607 mm
Altura total	516 mm
Conexión línea aspiración	16 mm - 5/8"
Conexión línea líquido	10 mm - 3/8"
Ventilador: Cantidad	1
Tensión (otro bajo demanda)	230V-1-50Hz (Standard)
Corriente / capacidad de cada ventilador	0,56A / 125 W
Flujo volumétrico de aire del condensador 50Hz	1840 m³/h
Tensión (otro bajo demanda)	230V-1-60Hz (Standard)
Corriente / capacidad de cada ventilador	0,78 A / 175 W
Flujo volumétrico de aire del condensador 50Hz	2070 m³/h
Fans: elect. Speed control	Option
Coil Volume	2,5 dm³
Recipiente colector (standard)	FS056
Máx. carga refrigerante 90% a 20°C	
R22	6,1 kg
R134a	6,2 kg
R407C	5,8 kg
R404A/R507A	5,4 kg
Separador de aceite	Option
Retención incorporada	Option
Conmutador de alta y baja presión	Option
Accesorios	Option
Caja protectora contra los agentes meteorológicos	Option
Potencia sonora (-10°C / 45°C)	73,5 dB(A) @ 50Hz
Presión sonora @ 1m (-10°C / 45°C)	65,5 dB(A) @ 50Hz
Datos de compresores: ver programa compresor	

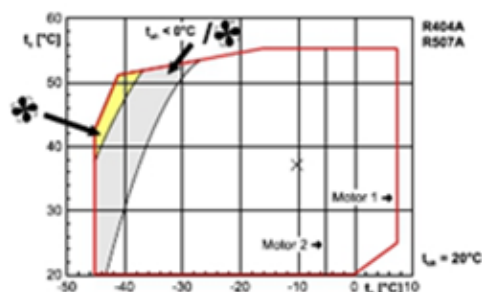
 Version 5.3.2	Unidad condensadora 06/09/2012 / Todos los datos son susceptibles de cambio
--	--

# Selección del Compresor: Unidades condensadoras

## Valores de entrada

Unidad modelo	LH44/2HC-1.2Y
Serie	Temp. ambiente alta
Refrigerante	R507A
Temperatura de referencia	Temp. en el punto de rocío
Temp. de evaporación	-10°C
Temperatura ambiente	25°C
Recalentamiento de gas aspirado	5K
Alimentación eléctrica	400V-3-50Hz
Recalentamiento útil	100%
Regulador de capacidad	100%

## Límites de aplicación



## Resultado

Unidad modelo	LH44/ 2HC-1.2Y-40S
---------------	-----------------------

Potencia frigorífica	3.48 kW
Potencia en el evap.	3.48 kW
Potencia absorbida*	1.47 kW
Corriente (400V)	2.85 A
Gama de tensiones	380-420V
Caudal másico	112.8 kg/h
Temp. de condensación	36.8 °C
Subenfriamiento del líquido	3.00 K
Modo de funcionamiento	Standard

\*Potencia absorbida compresor, potencia absorbida ventilador ver "Datos técnicos."



## Anexo 4: Hoja de características del intercambiador de placas



SSP G7

R

EVAPORADOR - Rating

INTERCAMBIADOR : V25Tx20

Nombre del fluido Circ. 1 : R507A  
Nombre del fluido Circ. 2 : Cloruro de calcio-agua (25.0 %)

Flow Type : Counter-Current

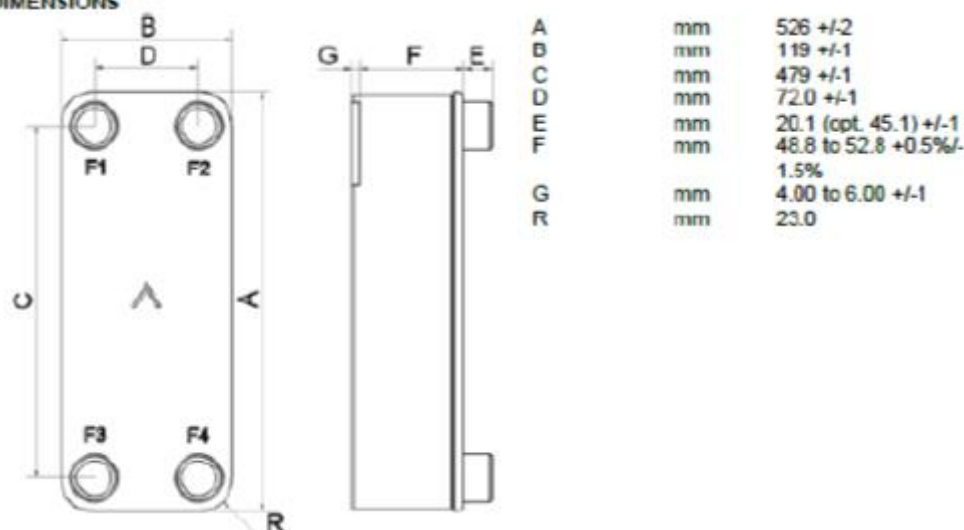
REQUERIMIENTOS		CIRC. 1	CIRC. 2
Potencia	kW	3.500	
Inlet vapor quality		0.37	
Outlet vapor quality		1.00	
Temperatura de entrada	°C	-9.56	0.02
Temperatura de evaporación	°C	-10.00	
Superheating	K	5.00	
Temperatura de salida	°C	-5.00	-2.00
Caudal	kg/s	0.03142	0.6000
- vapor de entrada	kg/s	0.01163	
Fluido evaporado	kg/s	0.01978	
Pérdida de carga máxima	kPa	50.0	50.0
INTERCAMBIADOR A PLACAS		CIRC. 1	CIRC. 2
Area de transferencia de calor	m²	1.13	
Flujo de calor	kW/m²	3.09	
MTD	K	8.83	
H.T.C. (available/required)	W/m², °C	1080/349	
Pérdida de carga - total	kPa	7.34	33.7
- en conexiones	kPa	-0.0629	0.672
Pressure drop in fluid distribution	kPa	17.1 - 26.2	
Presión de operación - salida	kPa	453	
Número de canales		9	10
Número total de placas		20	
Sobredimensionamiento	%	210	
Factor ensuciamiento	m², °C/kW	1.938	
Diámetro de las conexiones	mm	24.0/24.0 (up/down)	24.0
Diámetro de la conexión de entrada recomendado	mm	From 4.98 to 7.87	
Diámetro de la conexión de salida recomendado	mm	From 8.37 to 18.7	
Número de Reynolds			223
Velocidad en conexiones - outlet	m/s	3.07	1.07

PROPIEDADES FÍSICAS		CIRC. 1	CIRC. 2
Temperatura de referencia	°C	-9.74	-1.03
Líquido viscosidad	cP	0.199	4.76
densidad	kg/m³	1194	1240
calor específico	kJ/kg, °C	1.341	2.885
conductividad térmica	W/m, °C	0.08096	0.5337
P. de vapor viscosidad	cP	0.0107	
densidad	kg/m³	22.84	
calor específico	kJ/kg, °C	0.8821	
conductividad térmica	W/m, °C	0.01163	
- Latent heat	kJ/kg	0.1697	
Coefficiente del film	W/m², °C	4460	5910
Temperatura media de pared	°C	-5.31	-5.04
Velocidad en canal	m/s	0.682	0.214



#### TOTALS

Peso total (sin connections)	kg	6.30 - 8.07
Volumen contenido, circuito interno	dm³	0.999
Volumen contenido, circuito externo	dm³	1.11
PortSize F1/P1	mm	24.0
PortSize F2/P2	mm	24.0
PortSize F3/P3	mm	24.0
PortSize F4/P4	mm	24.0
NND F1/P1	mm	18.0 and/or 27.0
NND F2/P2	mm	18.0 and/or 27.0
NND F3/P3	mm	18.0 and/or 27.0
NND F4/P4	mm	18.0 and/or 27.0

#### DIMENSIONS



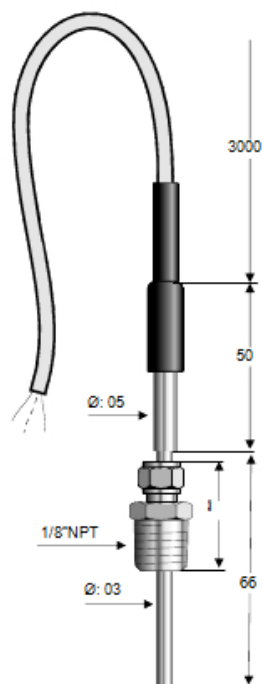
## Anexo 5: Hoja técnica de los sensores PT100

 		Ref.: SR-BZH-66/50-3Z-316-03/05-18N-PB01-150	
N/Ref:	S/Ref:	Cliente: UNIVERDSIDAD POL. CARTAGENA	Fecha: 26.04.10

SERVICIO	
N° TAG	
CANTIDAD	
FLUIDO Y ESTADO	
TEMP. NORM. / MAX.	
PRES. NORM. / MAX.	
VISCOSIDAD	
CLASIF. DEL CONJUNTO	
CLASIF. DE ZONA	
CLASIF. ELECTRICA	
TARJETA TAG	

EXTENSIÓN y CABLE	
TIPO DE EXTENSIÓN	CABLE
MATERIAL	COBRE
DIMENSIONES	4 HILOS DE 0.25 mm SEC
SUJECIÓN AL CABLE	PRENSADO
SALIDA CABLE	TERMORRETRACTIL
CONEXIÓN A PROCESO	-
CABLE DE CONEXIÓN	COBRE ESTAÑADO
CUBIERTA EXTERIOR.	SILICONA
DIMENSIONES	3 METROS
TERMINALES / CONECTOR	-

ELEMENTO	
SENSOR: TIPO / HILOS	PT-100 / 3 HILOS
NORMA / TOLERANCIA	IEC-751 / B - 1/10 DIN
NÚMERO DE SENSORES	UNO
MATERIAL DE FUNDA INT.	AISI-316
LONG. / DIAM. DE FUNDA	VER ESPECIFICACION
RANGO TEMPERATURA	-50 / +150°C
CONEXIÓN INTERIOR	CABLES SILICONA
AISLAMIENTO	PTF
TIPO DE RELLENO	-



## Anexo 6: Hoja de características técnicas de los sensores RTD

<b>Pyro-Alloy, S.L.</b>		Ref.: CR-BNNs-XXX/50-316-06-12G-PB01-250	
N/Ref:	S/Ref:	Cliente: UNIVERSIDAD POL. CARTAGENA	Fecha: 15.05.12

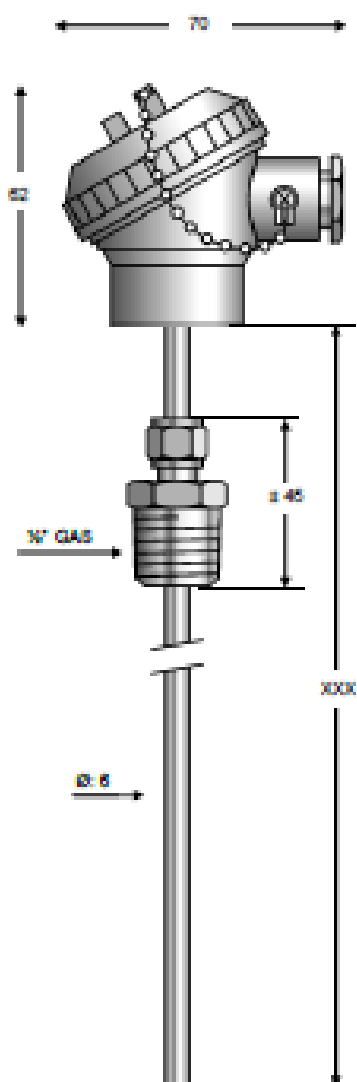
APLICACION	
Nº TAG	
CANTIDAD	
FLUIDO Y ESTADO	
TEMP. NORM. / MAX.	
PRES. NORM. / MAX.	
VISCOSIDAD	
CLASIF. DEL CONJUNTO	
CLASIF. DE ZONA	
CLASIF. ELECTRICA	
TARJETA TAG	

CABEZA Y EXTENSION	
TIPO / MODELO	DIS-Ns
MATERIAL	ALUMINIO + EPOXI
TAPA / CADENA	ROSCADA + CADENA
CONEXIÓN MECÁNICA	1/2" GAS
CONEXIÓN ELECTRICA	3/8" GAS
ZOCALO / BORNES	BP-4
EXTENSION CONEXIÓN	-
DIMENSIONES	-
CLASIF. ZONA	-
CLASIF. ELECTRICA	-

ELEMENTO	
SENSOR: TIPO / HILOS	PT-100 / 4 HILOS
NORMA / TOLERANCIA	IEC 751 / B 1/10 DIN
NÚMERO DE SENSORES	UNO
MATERIAL DE FUNDA	AISI-316
LONG. / DIAM. DE FUNDA	VER ESPECIFICACION
RANGO TEMPERATURA	-20 / +250°C
TIPO DE CONEXIÓN	1/2" GAS – BICONO AJUST.
AISLAMIENTO	PFA
TIPO DE RELLENO	MgO COMPACTADO

TRANSMISOR	
TIPO / MODELO	
RANGO / ENTRADA	
SALIDA / ALIMENTACION	
AISLAMIENTO (VOLTS)	
INDICADOR LOCAL	
RANGO	

TERMOPUZZO o FUNDA	
TIPO / MODELO	
MATERIAL	
ESTRUCTURA	
LONG. DE INSERCIÓN	
LONGITUD TOTAL	
DIÁMETRO	
CONEXIÓN A PROCESO	



- Cotas en mm.  
- XXX= 110 y 210

# Anexo 7: Hoja de características técnicas de los sensores de presión

GE  
Sensing & Inspection Technologies

## UNIK 5000

### Calibration Data and Installation Instructions

SP-2

SAIDA

Date	: 04 March 2011	Serial Number	: 3326692
Supply voltage	: 12 to 32 V dc	Output signal	: 0 to 10 V dc
Pressure range	: 0 to 20 bar absolute	Pressure connection	: G1/4 Female
Part number	: A5076-TB-A3-CB-H0-PA		



### Electrical Details

<b>Power Supply Requirements</b> Supply voltage..... 12 to 32 V dc	<b>Electrical Connection</b> DIN 43650 form A
<b>Output Signal</b> 0 to 10 V dc (4 wire)	<b>Wiring Details</b> +ve Supply ..... <i>marrón</i> ..... 1 -ve Supply ..... <i>blanco</i> ..... 2 +ve Output ..... <i>verde</i> ..... 3 -ve Output ..... <i>amarillo</i> ..... E

### Calibration Data

#### Room Temperature Calibration

Pressure (bar a)	Measured Deviation	Permitted Deviation
0.035	-0.007 %FS	0.04 %FS BSL
4.000	0.002 %FS	0.04 %FS BSL
8.000	0.006 %FS	0.04 %FS BSL
12.000	0.005 %FS	0.04 %FS BSL
16.000	0.002 %FS	0.04 %FS BSL
20.000	-0.008 %FS	0.04 %FS BSL
19.999	-0.003 %FS	0.04 %FS BSL
10.000	0.008 %FS	0.04 %FS BSL
0.035	-0.005 %FS	0.04 %FS BSL

#### Zero and Span Check

Low Range Output	: 0.002 V
Full Range Output	: 9.998 V
Span	: 9.996 V

GE

Sensing & Inspection Technologies

# UNIK 5000

## Calibration Data and Installation Instructions

ENTRADA

Date	: 04 March 2011	Serial Number	: 3326698
Supply voltage	: 12 to 32 V dc	Output signal	: 0 to 10 V dc
Pressure range	: 0 to 20 bar absolute	Pressure connection	: G1/4 Female
Part number	: A5076-TB-A3-CB-H0-PA		



### Electrical Details

501

#### Power Supply Requirements

Supply voltage..... 12 to 32 V dc

#### Output Signal

0 to 10 V dc (4 wire)

#### Electrical Connection

DIN 43650 form A

#### Wiring Details

+ve Supply	maron	1
-ve Supply	blanco	2
+ve Output	verde	3
-ve Output	amarillo	E

### Calibration Data

#### Room Temperature Calibration

Pressure (bar a)	Measured Deviation	Permitted Deviation
0.035	-0.003 %FS	0.04 %FS BSL
4.000	0.003 %FS	0.04 %FS BSL
8.000	0.006 %FS	0.04 %FS BSL
12.000	0.003 %FS	0.04 %FS BSL
16.000	0.000 %FS	0.04 %FS BSL
20.000	-0.004 %FS	0.04 %FS BSL
19.999	0.000 %FS	0.04 %FS BSL
10.000	-0.001 %FS	0.04 %FS BSL
0.034	-0.004 %FS	0.04 %FS BSL

#### Zero and Span Check

Low Range Output	: 0.003 V
Full Range Output	: 10.002 V
Span	: 9.998 V

K0477 Issue No. 3  
PS1297 V1.03



## PIEZORESISTIVE PRESSURE TRANSMITTERS

## SERIES 23 / 25

ABSOLUTE-, GAUGE- AND DIFFERENTIAL PRESSURE

These piezoresistive transmitters have been designed for precision applications in industrial environments for pressures ranging from 0,2 to 1000 bar, liquids or gas.

Series 23: Male pressure port

Series 25: Flush diaphragm

### A Complete Range

Absolute, barometric, gauge (over- and underpressure) and differential for wet/wet applications. 13 nominal pressure ranges. Current or voltage output.

### Flexibility

A modular concept uses the selection of off-the-shelf capsules, allowing a customised production. Numerous options and variants are available, fully adapted to the customer's requirements: Mechanical and electrical interface, ports, signal outputs, materials in media contact, oil filling, oxygen-compatibility, special features, flameproof versions...

### Reliability / Quality

These transmitters use the highly stable KELLER Series 10 capsules, proven in millions of applications throughout the world. Each capsule is subjected to severe tests and calibration procedures. The transmitters are manufactured and tested according to ISO 9001 / EN 29001.

The type of the transmitter is defined according to the reference pressure:

- PAA-23/25 Absolute Pressure Transmitter (Zero at 0 bar abs.)
- PA-23/25 Sealed Gauge Pressure Transmitter (Zero at = 1 bar abs.)
- PR-23/25 Vented Gauge Pressure Transmitter (Zero at atmospheric)
- PD-23 Differential Pressure Transmitter (wet / wet)



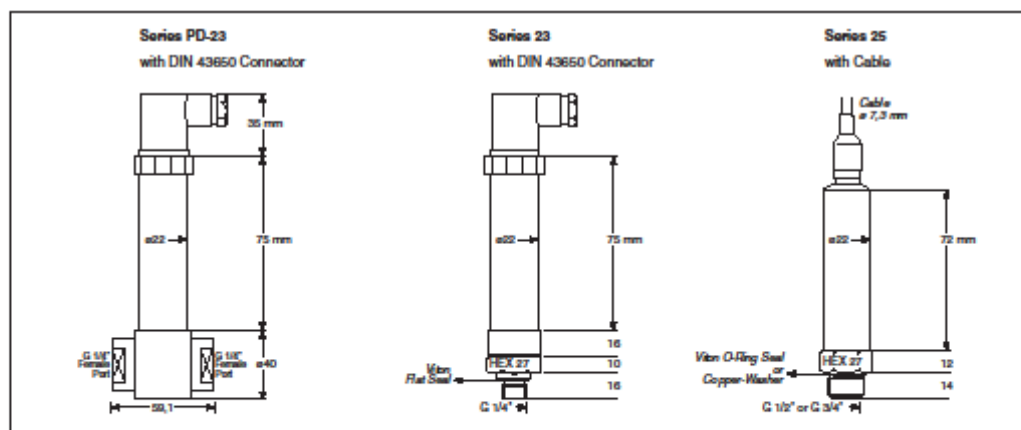
Series PD-23



Series 23



Series 25



Subject to alterations

09/98

KELLER AG für Druckmesstechnik  
KELLER Gas für Druckmesstechnik mbH

St. Gallenstrasse 119  
Schwarzwaldstrasse 17

CH-8404 Winterthur  
D-79708 Jestetten

Tel. +41 (0)52 - 235 25 25  
Tel. +49 (0)7745 - 9214 - 0

Fax +41 (0)52 - 235 25 00  
Fax +49 (0)7745 - 9214 - 60

Companies approved to ISO 9001:2000

www.keller-druck.com



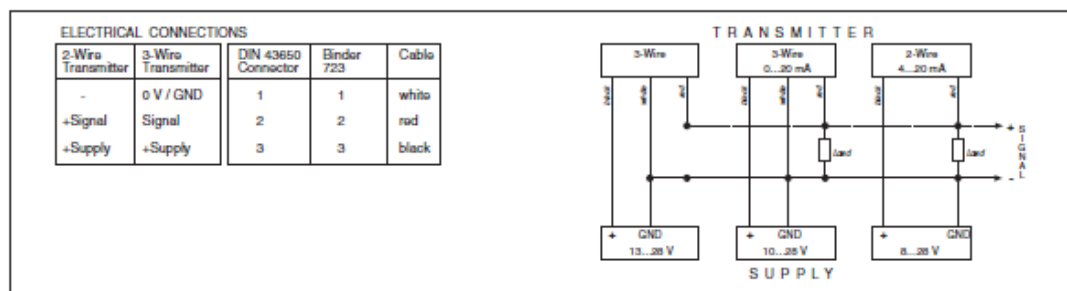
# KELLER

## SPECIFICATIONS

	Pressure Ranges (FS) in Bar												
PR-23/25	-1	-0,5	-0,2	0,2	0,5	1	2	5	10	20			
PD-23				0,2	0,5	1	2	5	10	20			
PAA-23/25				0,2	0,5	1	2	5	10	20			
PA-23/25						1	2	5	10	20	50	100	200
											400	600	1000
Overpressure	-1	-1	-1	2,5	2,5	3	4	10	20	40	100	200	300
											600	900	1100
Overpressure Ref.-Side PD				1	1	2	3	5	7	10			
PD, static line pressure	200 bar max.												
Linearity <sup>(1)</sup> + Hysteresis + Repeatability	± 0,2 %FS typ. ± 0,5 %FS max. <sup>(1)</sup> best straight line, based zero												
Storage-/Operating Temperature	-40...100 °C												
Compensated Temperature Range	-10...80 °C												
Temperature Coefficients...	...of Zero, in %FS/°C ...of Sensitivity, in %/°C												
- Range > 1 bar	0,005 typ.			0,01 max.			0,02 max.						
- Range 1 bar	0,010 typ.			0,02 max.			0,02 max.						
- Range 0,5 bar	0,015 typ.			0,03 max.			0,02 max.						
- Range 0,2 bar	0,025 typ.			0,05 max.			0,02 max.						
Stability													
- Range > 2 bar	0,1 %FS typ.			0,2 %FS max.									
- Range ≤ 2 bar	1 mbar typ.			2 mbar max.									
Signal Output / Type	4...20 mA / 2-Wire				0...20 mA / 3-Wire				0...10 V / 3-Wire				
Supply	8...28 VDC				10...28 VDC				13...28 VDC				
Load Resistance (R <sub>L</sub> )	(U - 10 V) / 0,02 A				(U - 5 V) / 0,02 A				> 5 k				
Electrical Connection	- Plug DIN 43650												
	- Cable (with reference tube for gauge)												
Volumetric Change	< 0,1 mm³												
Pressure Connection	See drawings front page												
Material in Media Contact	Stainless steel 316L (DIN 1.4435), Viton®												
Protection	IP65												
Weight	PR/PA/PAA: ≈ 180 g. PD: ≈ 440 g												
Insulation	> 100 MΩ@50 V												
Endurance	> 10 million cycles 0...100 %FS at 25 °C												
Frequency Response	1 kHz (5 kHz option)												

### Options

Pressure Connection, Electrical Out	On request; many possibilities
Pressure Ranges	Other pressure ranges between 0,2 and 1000 bar, diff. units
Linearity Specifications	± 0,1 and ± 0,2 %FS or any customer requirement
Materials in Contact with Media	Many possibilities
Oil Filling	Fluorized oil (O <sub>2</sub> -compatible), olive-oil, low temperature oil
Hazardous Applications	Flameproof- and intrinsically safe version
Protection	IP67, IP68 (cable version)
Higher Static Line Pressure	up to 600 bar (PD only)



Subject to alterations

03/08

KELLER AG für Druckmesstechnik  
KELLER Ges. für Druckmesstechnik mbH

St. Gallenstrasse 119  
Schwarzwaldstrasse 17

CH-8404 Winterthur  
D-79798 Jestetten

Tel. +41 (0)52 - 235 25 25  
Tel. +49 (0)7745 - 9214 - 0

Fax +41 (0)52 - 235 25 00  
Fax +49 (0)7745 - 9214 - 60

Companies approved to ISO 9001:2000

[www.keller-druck.com](http://www.keller-druck.com)





# Piezoresistive Pressure Transmitter

TYPE : PD-23 / 20bar / 8666.1  
OUTPUT : 0 ... 10 V  
RANGE : 0 ... 20 bar

Prod.No: 222305.2217

SN: 106691



Linearity	0.09	%FS(Lnorm)	bar	V
Max.Pressure	30	bar	0	0.000
Supply	13 ... 28	V DC	5	2.509
Comp.Temp.Range	-10 ... 80	°C	10	5.012
			15	7.508
			20	9.998

1 : GND  
2 : +OUT  
3 : +Vcc

17.03.2010

1  
NR

KELLER Druckmesstechnik

CH-8404 Winterthur, St.Gallerstrasse 119

D-79798 Jestetten, Schwarzwaldstrasse 17

## Anexo 8: Calibración de los termopares

La placa a través de la cual se realizará el intercambio de calor lleva soldados 26 termopares tipo T para poder realizar las medidas de temperatura de pared.

La distribución de los termopares en la placa es la que se mostró anteriormente, y están soldados a la placa a una profundidad de la mitad del espesor de la placa.

Es necesario calibrar los termopares tanto a bajas temperaturas (calibración aplicable para el funcionamiento como generación de hielo líquido) como a altas temperaturas (calibración aplicable en el caso de que la instalación funcione para el calentamiento de fluidos altamente viscosos).

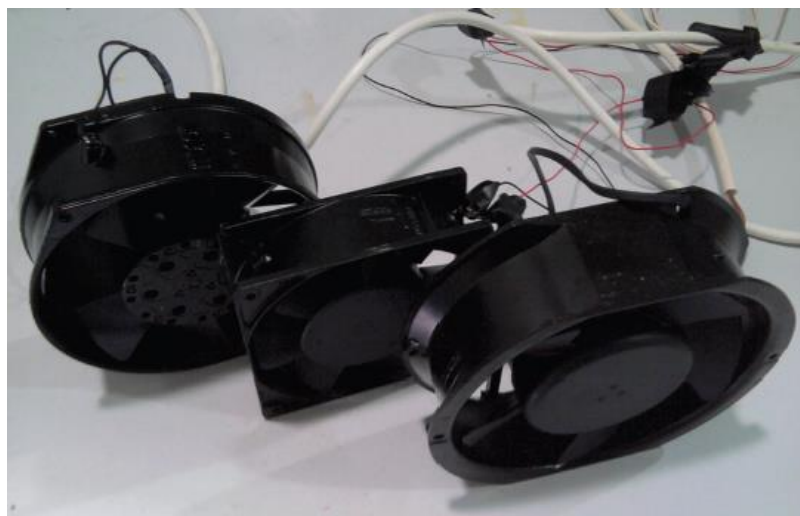
Para la calibración en frío se va a emplear un arcón frigorífico de uso comercial, capaz de alcanzar los 20<sup>0</sup>C bajo cero. Para evitar problemas de fluctuación de temperaturas debidas al termostato, el arcón dispone de un interruptor para puentearlo, permitiendo así hasta un máximo de 24 horas de funcionamiento ininterrumpido.



*Figura 89: Arcón frigorífico empleado en la calibración*

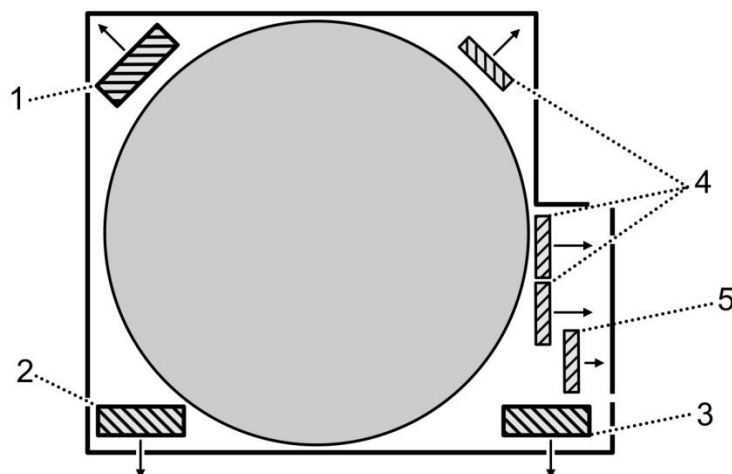
Como temperatura de referencia para la calibración se van a emplear dos sondas PT100, unidas a la placa mediante pasta termoconductora, de forma que la temperatura medida por los termopares y la medida por las sondas sea la misma.

Para la calibración es necesario realizar medidas a distintas temperaturas. Esto lo vamos a conseguir mediante el empleo de diversas cargas térmicas en el interior del arcón. Las cargas térmicas a emplear han sido ventiladores, con potencias de 32W, 52W y 80W.



*Figura 90: Ventiladores empleados como cargas térmicas*

Para evitar la acción directa de los ventiladores sobre las sondas o termopares, se han situado de forma que no incidan directamente sobre ellas.



*Figura 91: Colocación de los ventiladores y de la placa en el interior del arcón*

Para la calibración a altas temperaturas (hasta 100°C) se ha empleado el arcón como espacio cerrado pero sin conectar, aplicando únicamente las distintas cargas térmicas.

Los distintos ensayos realizados quedan recogidos en la siguiente tabla, resultando un total de once ensayos de frío y seis ensayos de calor.

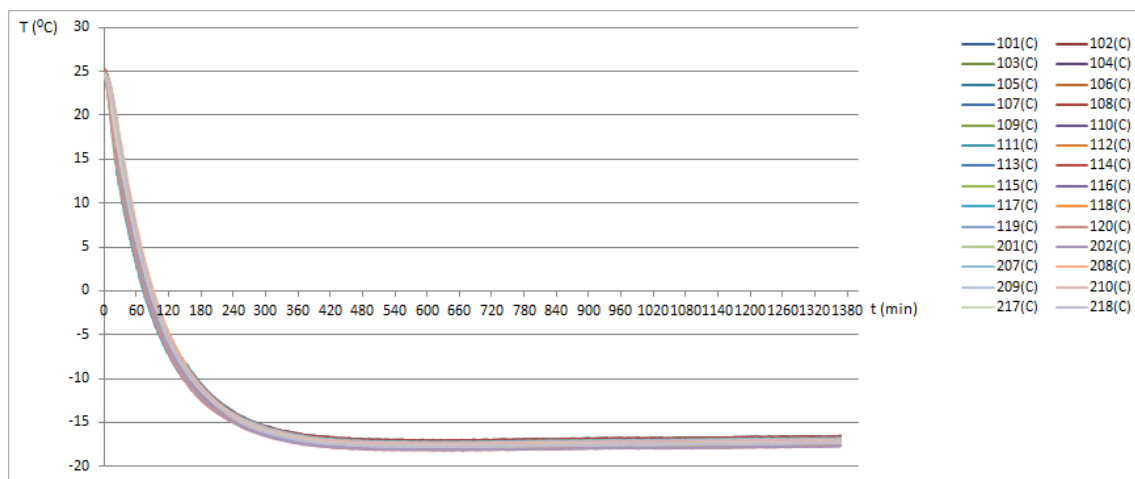
Ensayo	Arcón		Ventiladores					Potencia (W)	Fechas
	ON	OFF	V1	V2	V3	V4	V5		
<b>F1</b>	X	-	-	-	-	-	-	0	02/10/2012 03/10/2012 04/10/2012
<b>F2</b>	X	-		X				52	05/10/2012 06/10/2012
<b>F3</b>	X	-				X		96	07/10/2012
<b>F4</b>	X	-		X		X		148	08/10/2012
<b>F5</b>	X	-			X		X	84	10/10/2012
<b>F6</b>	X	-					X	32	11/10/2012 12/10/2012
<b>F7</b>	X	-	X					80	13/10/2012
<b>C1</b>	-	X	-	-	-	-	-	0	16/10/2012
<b>C2</b>	-	X		X				52	17/10/2012
<b>C3</b>	-	X	X	X				132	18/10/2012
<b>C4</b>	-	X	X			X		176	19/10/2012
<b>C5</b>	-	X		X	X	X	X	232	20/10/2012
<b>C6</b>	-	X	X	X	X	X	X	312	21/10/2012

*Figura 92 Ensayos de calibración para frío y para calor*

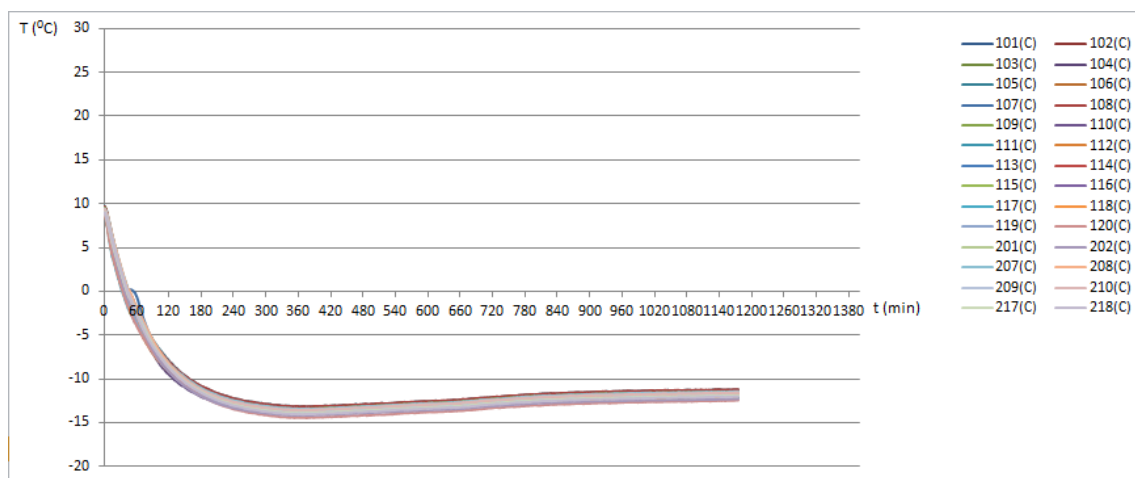
Por el alcance del proyecto, únicamente se muestra la calibración de los termopares para los ensayos de frío. Para la adquisición de los datos se empleó el mismo Data Logger. A continuación se representa la evolución de la temperatura para los distintos ensayos realizados de calibración, donde se toma la temperatura de estabilización como punto para calibrar.

## Ensayo F1

La configuración de este ensayo es la conexión única del arcón. Los ventiladores quedarían desconectados. Se realizaron tres con esta configuración, tomando también los puntos obtenidos. Las temperaturas para las cuales se estabilizan los ensayos son de  $-17^{\circ}\text{C}$ ,  $-12^{\circ}\text{C}$  y  $-19^{\circ}\text{C}$ .



*Figura 93: Ensayo de calibración con arcón conectado 1*



*Figura 94: Ensayo de calibración con arcón conectado 2*

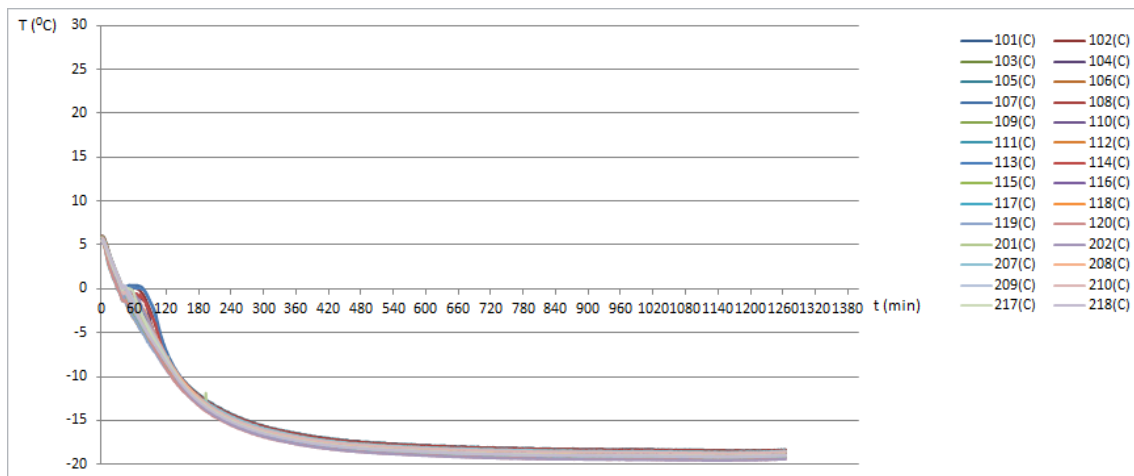


Figura 95: Ensayo de calibración con arcón conectado 3

## Ensayo F2

Para este ensayo se introduce por primera vez los ventiladores, conectando V2 con 52W. Se realizaron dos ensayos con esta misma configuración. Las temperaturas para las cuales se estabilizan los ensayos son de  $10^{\circ}\text{C}$  y  $-2^{\circ}\text{C}$ . Como se puede apreciar, en el último existe un termopar que falla, luego este no se tendrá en cuenta en la calibración para este ensayo.

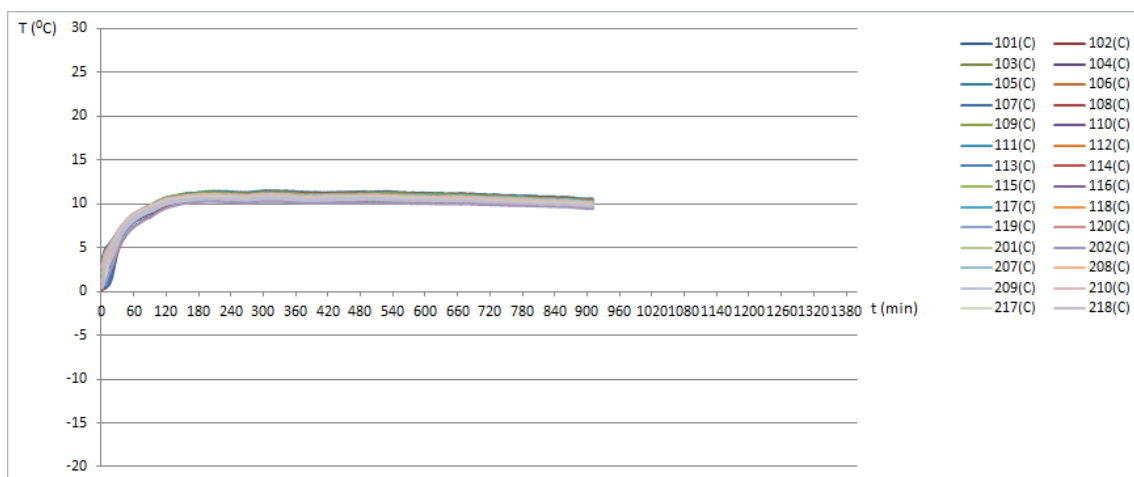


Figura 96: Ensayo de calibración con arcón y ventilador V2 conectados 1

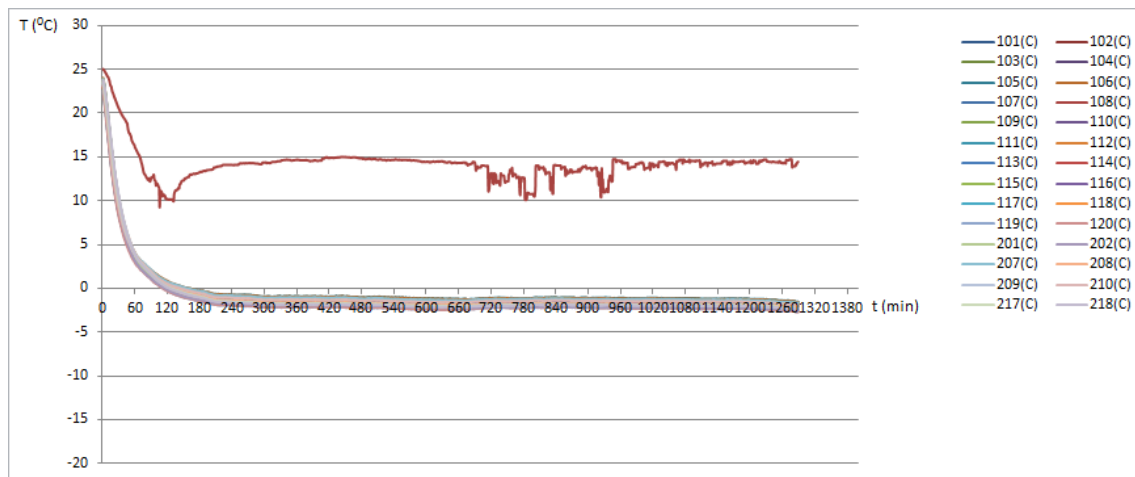


Figura 97: Ensayo de calibración con arcón y ventilador V2 conectados 2

### Ensayo F3

El ventilador conectado es V4, de 96W. La temperatura estable obtenida es de  $-7^{\circ}\text{C}$ . Se produce el fallo de los termopares 8 y 14.

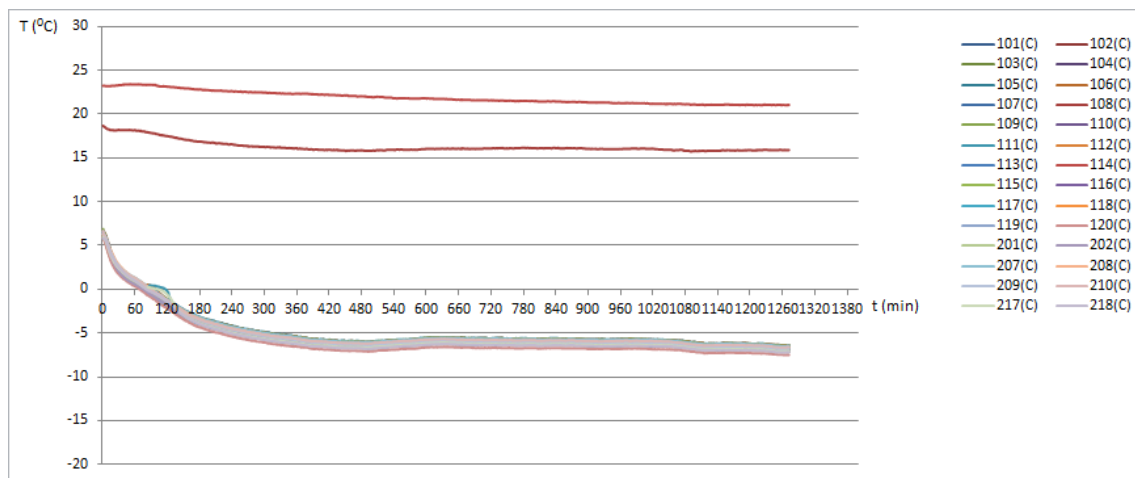


Figura 98: Ensayo de calibración con arcón y ventilador V4 conectados

### Ensayo F4

La configuración de este ensayo es del arcón y los ventiladores V2 y V4, con un total de 148W. Se alcanza una temperatura de  $3^{\circ}\text{C}$ . En esta ocasión falla el termopar 14.

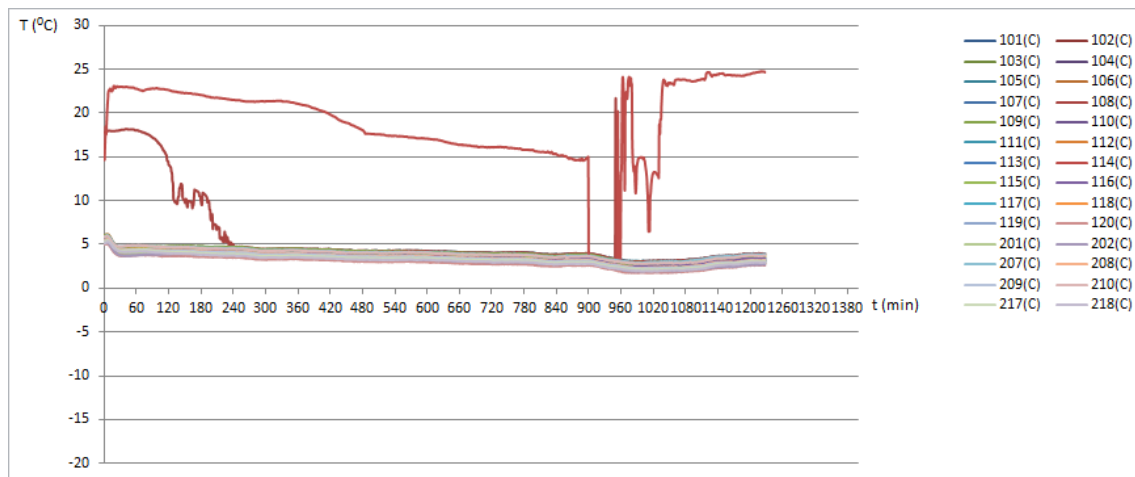


Figura 99: Ensayo de calibración con arcón y ventiladores V2 y V4 conectados

## Ensayo F5

Los ventiladores conectados son V3 y V5, introduciendo 84W. La temperatura estable es 1°C. Se produce el fallo de nuevo del termopar 14.

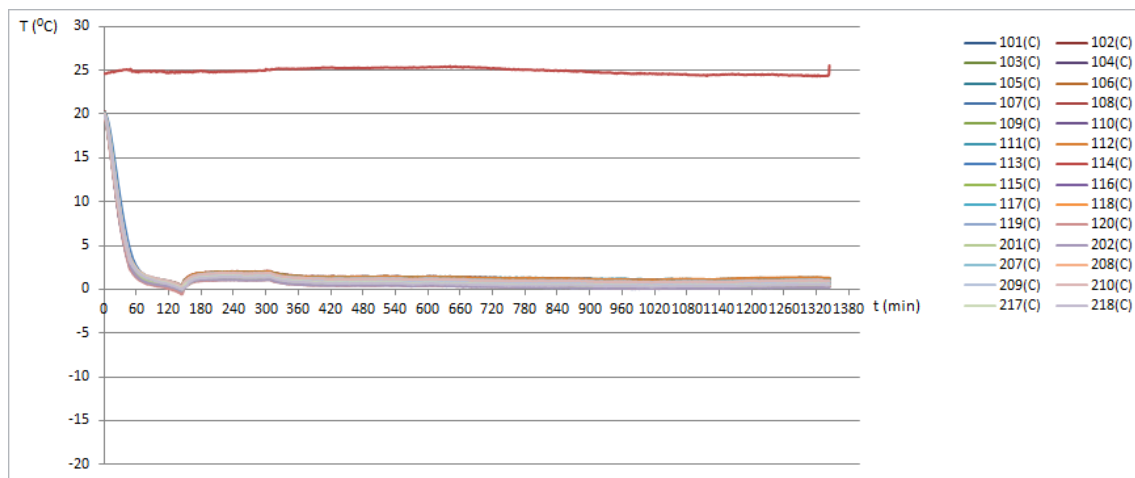
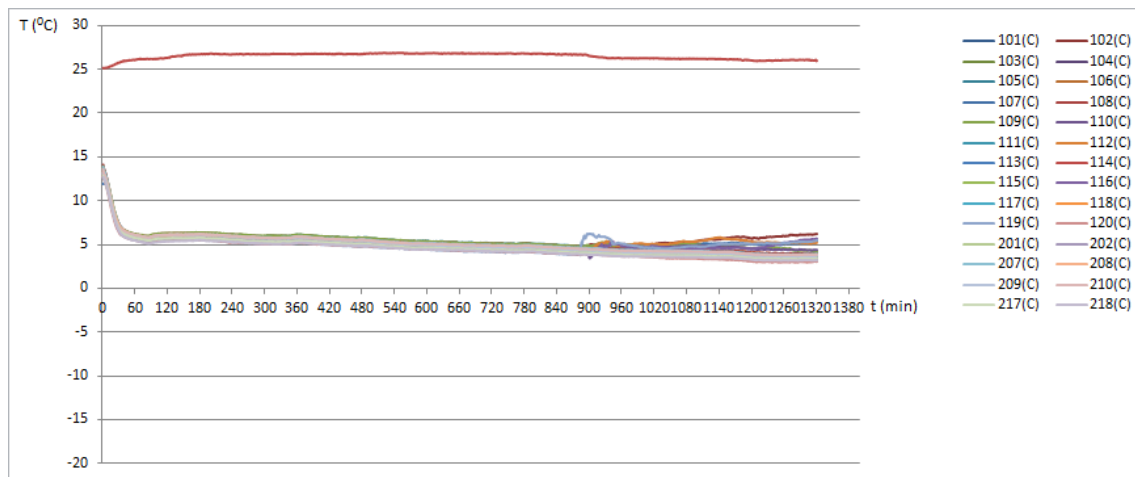


Figura 100: Ensayo de calibración con arcón y ventiladores V3 y V5 conectados

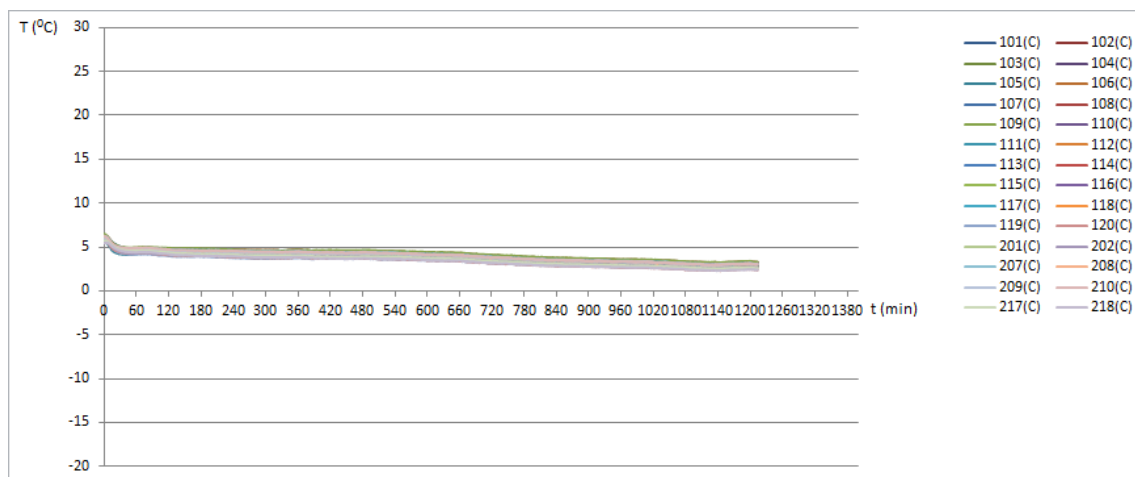
## Ensayo F6

Para este ensayo, se conecta el arcón y el ventilador V5 de 32W. La temperatura se estabiliza en 4°C y 3°C. Se produce el fallo en el primer ensayo de una gran parte de los termopares.





*Figura 101: Ensayo de calibración con arcón y ventilador V5 conectados 1*



*Figura 102: Ensayo de calibración con arcón y ventilador V5 conectados 2*

## Ensayo F7

La configuración ahora es el arcón conectado junto con el ventilador V1, introduciendo este último 80W. La temperatura estable es de  $-8^{\circ}\text{C}$ .

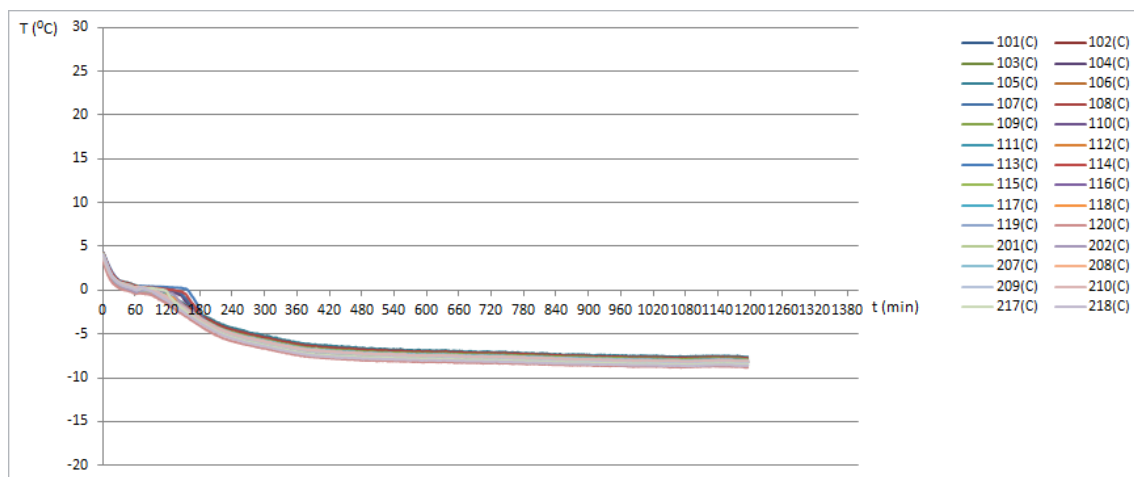


Figura 103: Ensayo de calibración con arcón y ventilador V1 conectados

En la siguiente tabla se muestran los valores de la temperatura para cada termopar y el valor de los coeficientes A y B de la recta de calibración.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	A	B	r <sup>2</sup>
TC1	-19,08	-17,39	-12,08	-8,16	-6,14	-1,90	0,69	3,63	4,45	4,12	10,68	1,019	-0,203	0,997
TC2	-19,21	-17,50	-12,23	-8,20	-6,05	-1,99	0,40	3,45	4,41	5,64	10,26	1,011	-0,251	0,998
TC3	-18,88	-17,20	-11,65	-8,00	-5,89	-1,78	0,67	3,81	4,43	4,11	10,69	1,029	-0,306	0,996
TC4	-19,09	-17,41	-12,11	-7,99	-5,89	-1,75	0,62	4,34	4,50	4,19	10,51	1,016	-0,319	0,996
TC5	-18,32	-16,75	-11,32	-7,52	-5,62	-1,14	1,44	4,28	4,22	5,97	11,36	1,017	-0,931	0,998
TC6	-18,40	-16,76	-11,47	-7,81	-5,67	-1,20	1,21	4,18	4,64	4,41	10,85	1,033	-0,636	0,997
TC7	-18,84	-17,30	-11,85	-7,95	-5,80	-1,61	1,08	3,84	4,45	4,94	10,72	1,017	-0,476	0,998
TC8	-18,32	-17,02	-11,30	-7,65	16,05	14,45	1,33	4,29	4,55	4,40	11,26	1,026	-0,751	0,996
TC9	-18,54	-17,25	-11,57	-7,79	-5,77	-1,35	1,22	4,39	4,61	4,95	11,18	1,012	-0,716	0,997
TC10	-18,82	-17,34	-12,12	-8,01	-6,09	-1,57	1,24	3,59	4,41	4,83	10,97	1,012	-0,439	0,998
TC11	-18,59	-17,09	-11,69	-7,97	-6,02	-1,36	1,32	3,62	4,39	4,20	10,91	1,029	-0,439	0,997
TC12	-18,79	-17,27	-11,95	-8,16	-5,92	-1,47	1,40	3,72	4,39	5,67	10,99	1,005	-0,604	0,999
TC13	-19,00	-17,63	-12,19	-8,18	-6,04	-1,85	0,73	3,47	4,16	3,96	10,52	1,024	-0,104	0,997
TC14	-18,95	-17,61	-11,90	-8,16	21,07	-1,67	25,32	21,32	4,24	26,77	10,77	1,010	-0,422	0,998
TC15	-18,68	-17,43	-11,70	-8,14	-5,84	-1,37	0,80	3,66	4,24	3,66	10,85	1,030	-0,279	0,995
TC16	-18,79	-17,30	-12,71	-8,15	-6,08	-1,68	0,60	3,63	4,25	4,63	10,81	1,016	-0,252	0,999
TC17	-19,14	-17,63	-14,04	-8,37	-6,26	-2,00	0,75	2,25	4,11	3,89	10,78	1,008	0,166	0,998
TC18	-19,18	-17,66	-12,80	-8,48	-6,36	-2,13	0,55	3,06	4,00	5,77	10,66	1,000	-0,148	0,999
TC19	-19,25	-17,56	-11,94	-8,44	-6,37	-2,17	0,46	2,00	3,69	5,07	10,43	1,029	0,102	0,997
TC20	-19,48	-17,93	-12,61	-8,71	-6,70	-2,29	0,42	3,04	3,78	5,49	10,57	0,998	0,011	0,998
TC27	-18,50	-17,22	-11,61	-7,90	-5,75	-1,24	1,01	4,12	4,43	4,15	11,00	1,026	-0,523	0,996
TC28	-18,92	-17,22	-11,80	-8,11	-5,99	-1,78	0,82	3,68	4,43	4,94	10,66	1,020	-0,375	0,998
TC29	-19,09	-17,48	-11,93	-8,20	-6,11	-1,94	0,58	3,87	4,26	3,67	10,47	1,026	-0,112	0,995
TC30	-18,69	-17,25	-11,65	-7,99	-5,90	-1,47	0,98	4,06	4,45	3,82	10,95	1,025	-0,414	0,995
TC37	-18,99	-17,45	-12,02	-8,40	-6,33	-1,87	0,52	3,44	3,91	3,39	10,73	1,030	0,015	0,995
TC38	-19,06	-17,75	-12,13	-8,60	-6,47	-1,95	0,46	3,27	3,82	3,20	10,62	1,028	0,148	0,995
PT100	-19,36	-17,74	-13,57	-8,44	-6,23	-2,01	0,57	3,06	4,09	5,05	10,39	1,000	0,000	1,000

Figura 104: Valores estables de temperatura para los ensayos realizados. Coeficientes A y B de la recta de calibración

Se muestra únicamente la gráfica correspondiente al primer termopar, siendo la del resto similar.

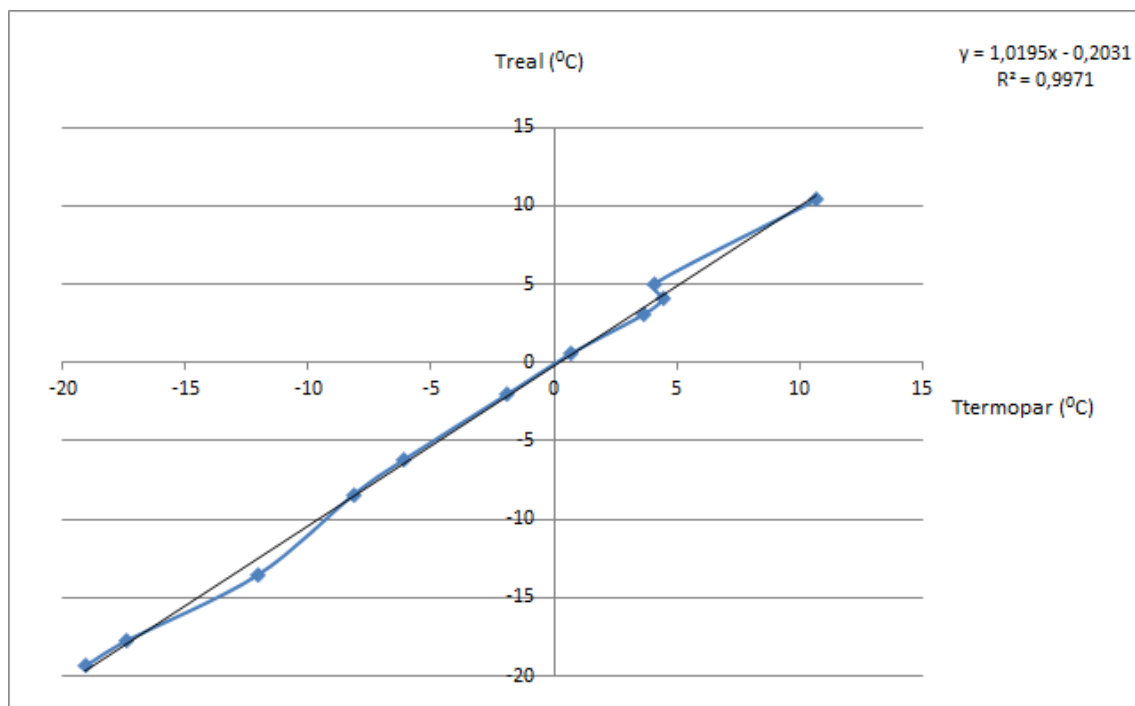


Figura 105: Representación gráfica de la temperatura real en función de la temperatura del termopar 1

## Anexo 9: Ensayos de generación de hielo líquido

A continuación se muestran los resultados individuales obtenidos de los ensayos experimentales realizados.

### 9.1. Ensayo 1A

En este ensayo se parte de una disolución que contiene 29.60 gramos de cloruro sódico por litro de disolución, a una temperatura de 14 grados centígrados (temperatura a la que está, de inicio, la disolución en el interior del intercambiador). El régimen de giro va a ser de 5 revoluciones por minuto. El salto de temperatura de  $4.9^{\circ}\text{C}$ .

Para estas condiciones, y haciendo uso del programa Agilent BenchLink Data Logger, se obtienen las medidas de los parámetros. Las gráficas obtenidas son las que a continuación siguen:

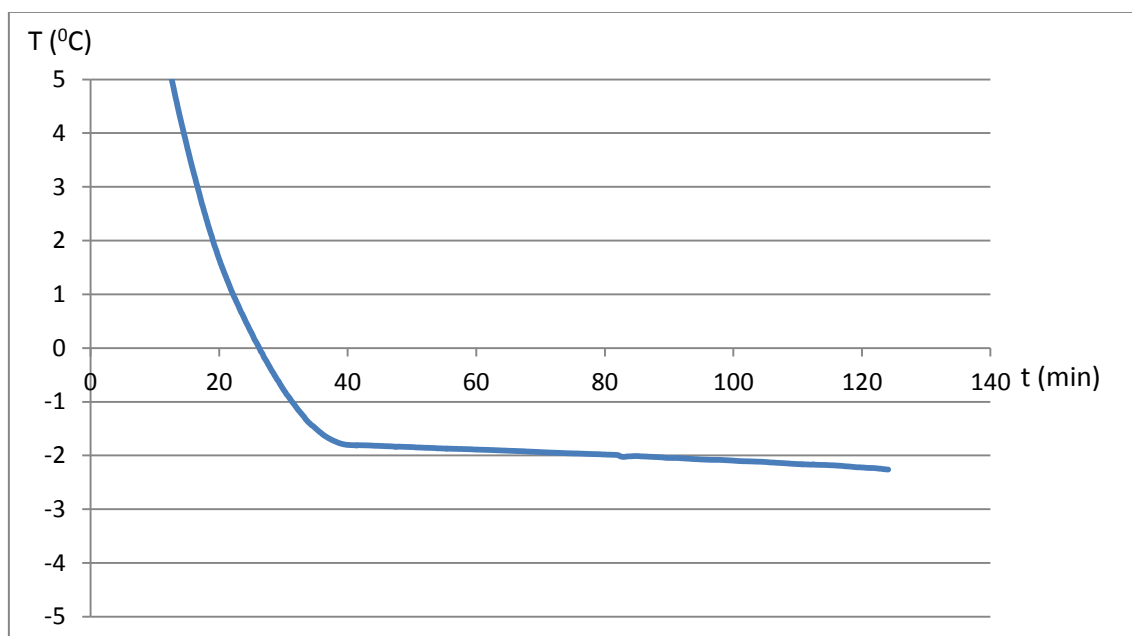


Figura 106: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 5 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $4.9^{\circ}\text{C}$

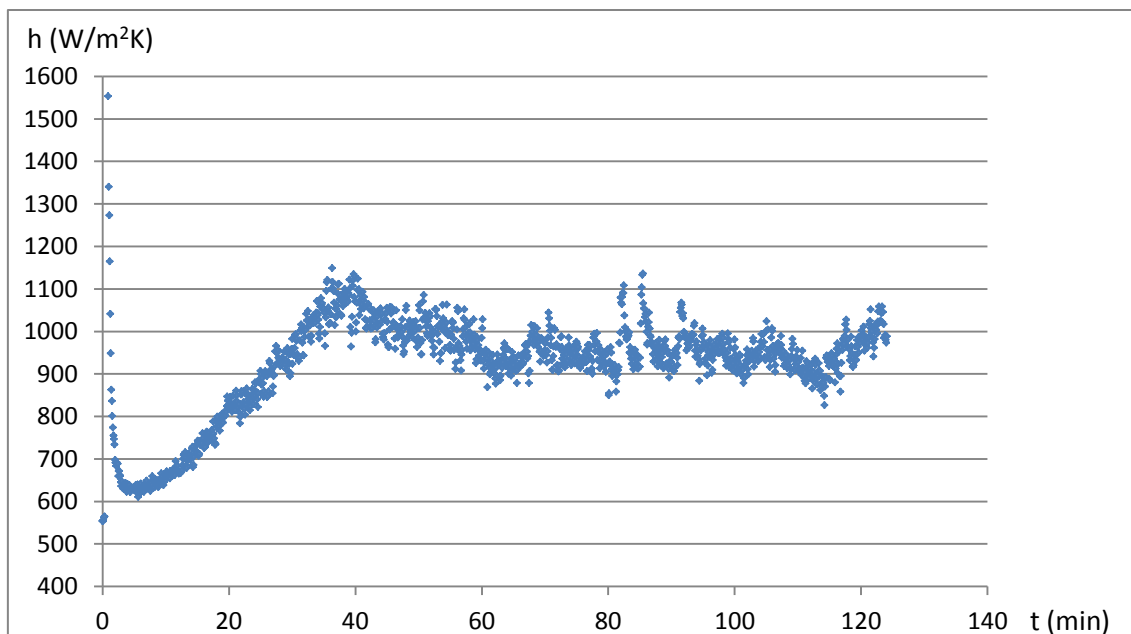


Figura 107: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 5 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

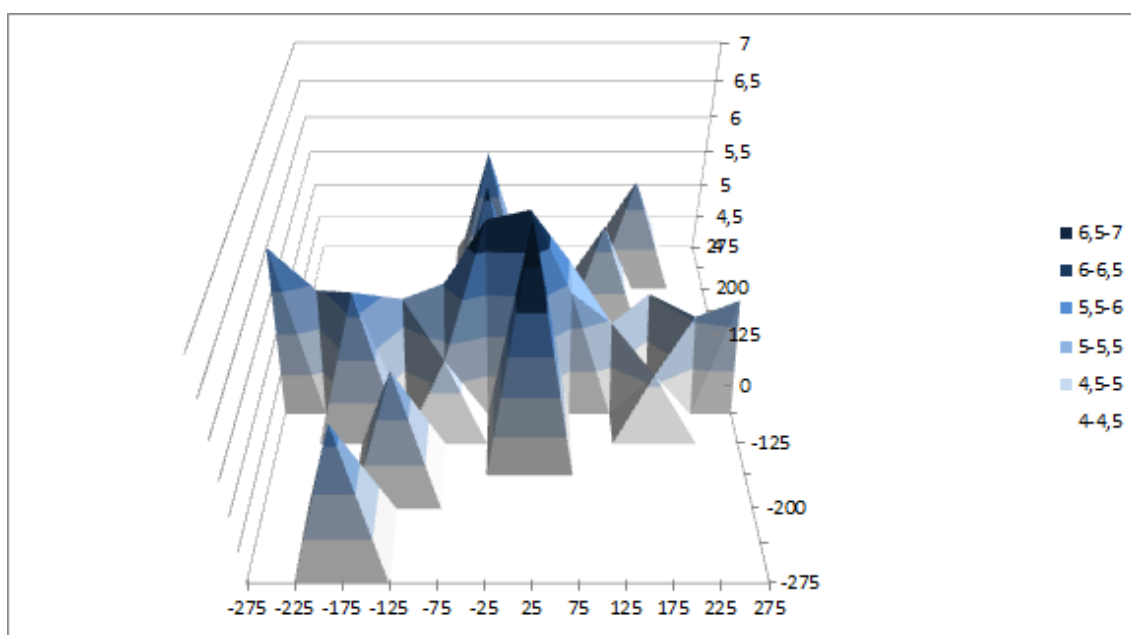
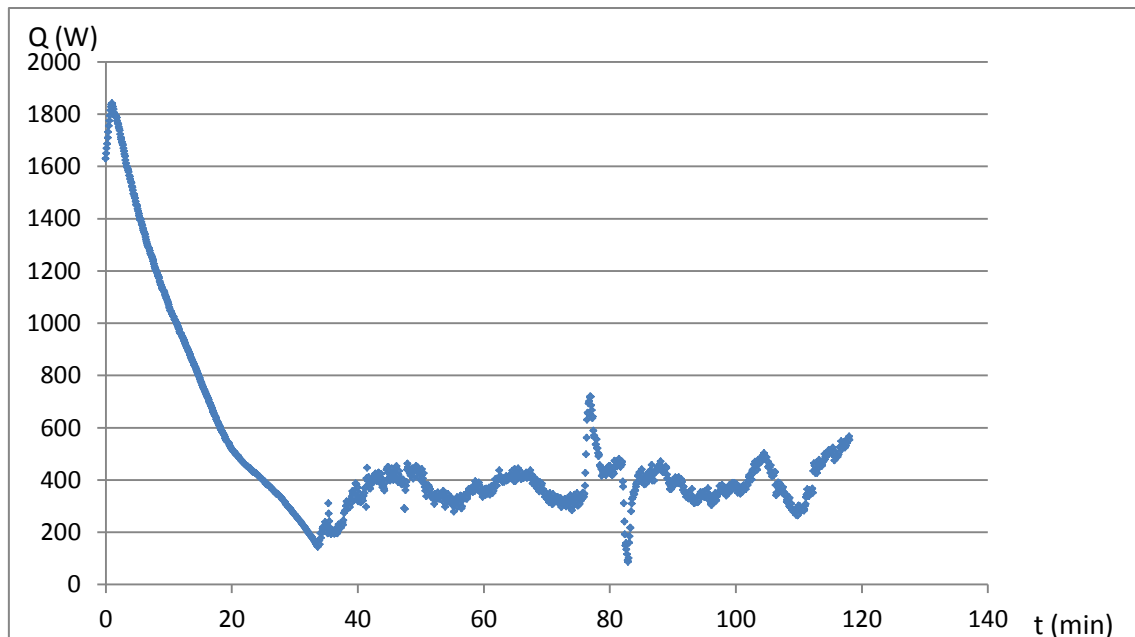
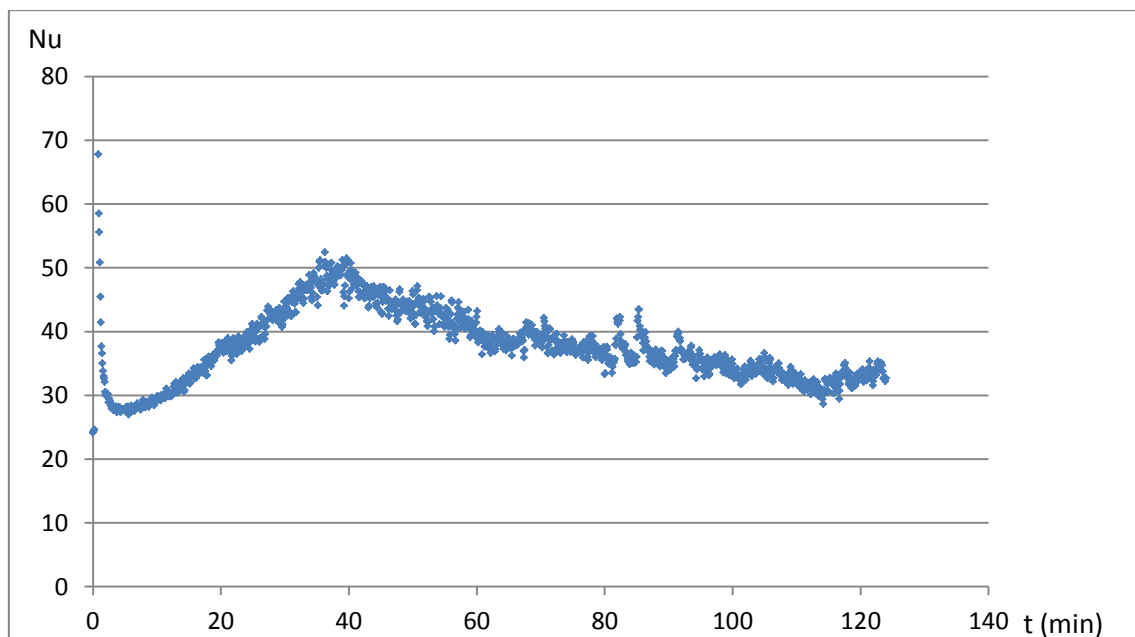


Figura 108: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 5 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C



*Figura 109: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 5 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C*



*Figura 110: Numero de Nusselt a 5 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C*

De las gráficas se observa que, para la geometría del rascador y las condiciones de temperatura, concentración y régimen de giro, el instante en el que comienza a producirse hielo es a los 38 minutos. Hasta este instante se

aprecia que tanto el número de Nusselt y el coeficiente de transmisión de calor aumentan debido al salto de temperatura existente, mientras que para tiempos posteriores ambos disminuyen por la formación de hielo. Los valores que se alcanzan son de 1149 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 52 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 38 minutos es de 38 para el número de Nusselt y 947 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor.

Por el mismo motivo, la potencia frigorífica va disminuyendo, partiendo de un valor máximo de 1842 W.

Por último, del mapa de distribución de temperaturas se ve que la placa está más fría en su zona central y a la entrada. Esto se debe a que el fluido entra a una temperatura menor y sale a una temperatura mayor por el proceso de enfriamiento que realiza sobre la disolución de NaCl, mientras que el efecto en la zona central es debido a que en el centro no existe apenas agitación de las partículas por medio de las palas. Estos mismos efectos se siguen apreciando de igual manera en los siguientes ensayos.

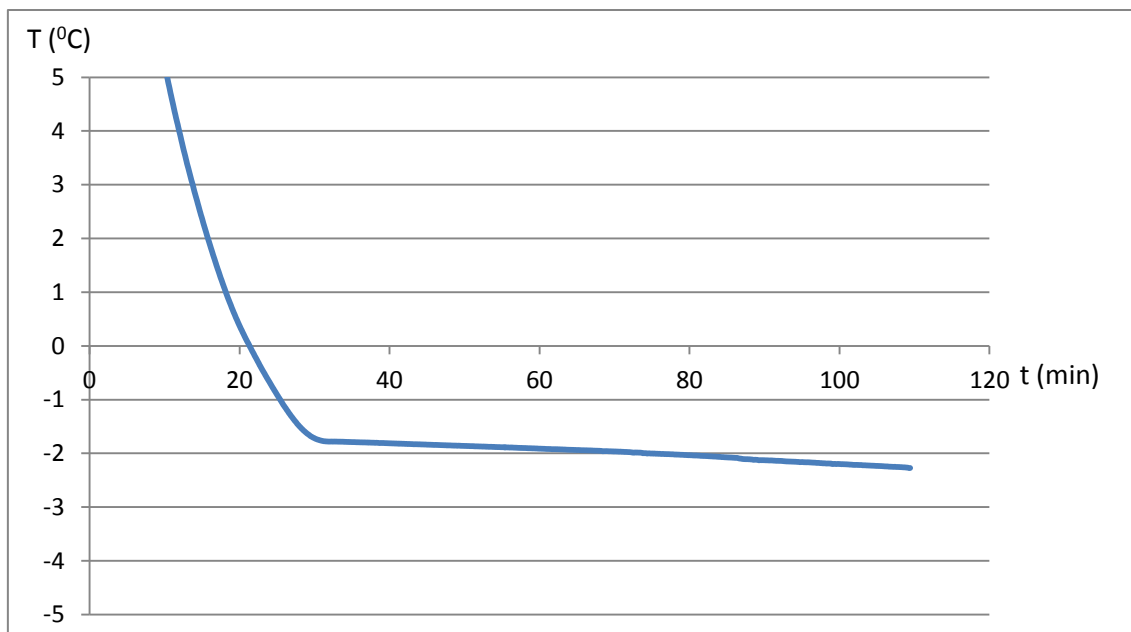
En la siguiente tabla se recogen los valores representativos de cada parámetro.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
38	52	38	1149	947	1842

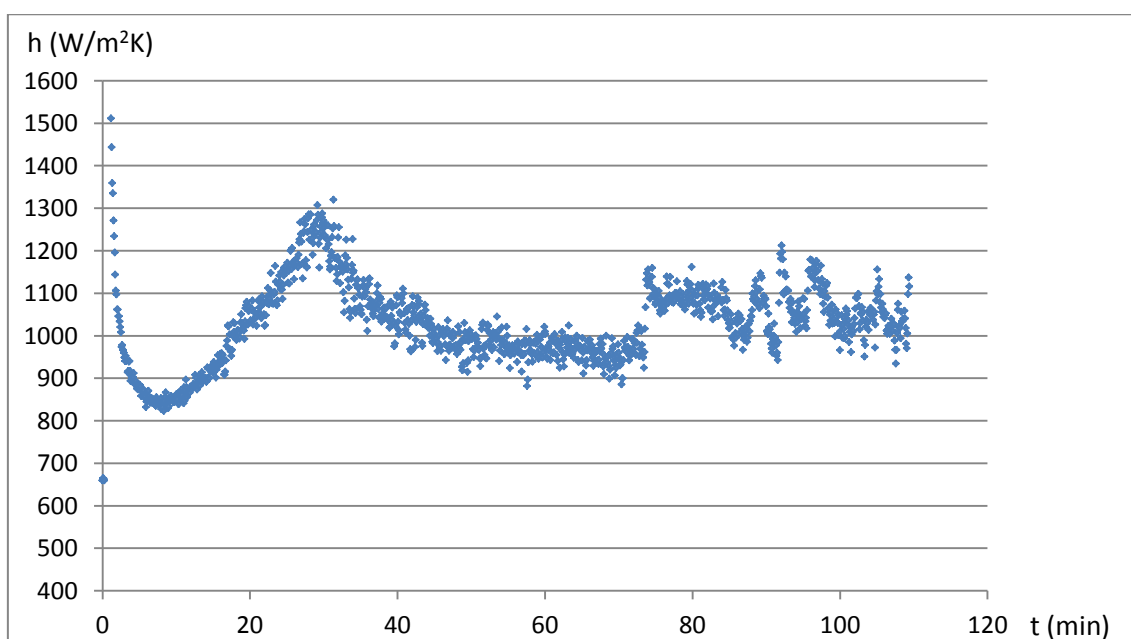
## 9.2. Ensayo 1B

La disolución de partida sigue siendo la misma (29.60 g/l). El régimen de giro impuesto ahora es mayor, 10 revoluciones por minuto.

De igual manera, las gráficas obtenidas son:



*Figura 111: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 10 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C*



*Figura 112: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 10 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C*



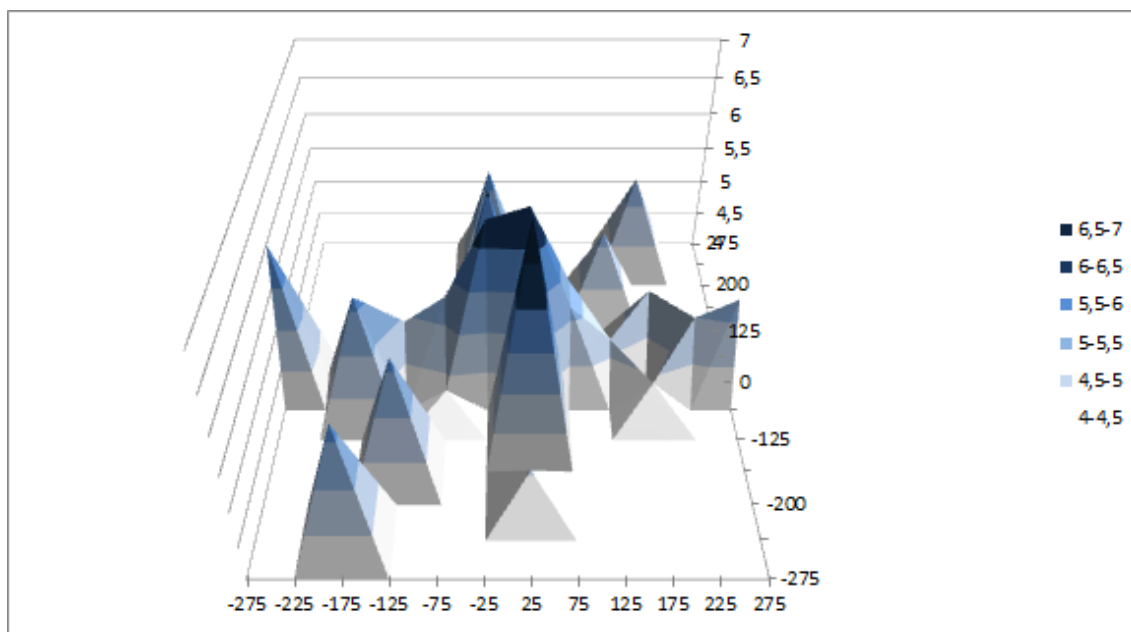


Figura 113: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 10 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

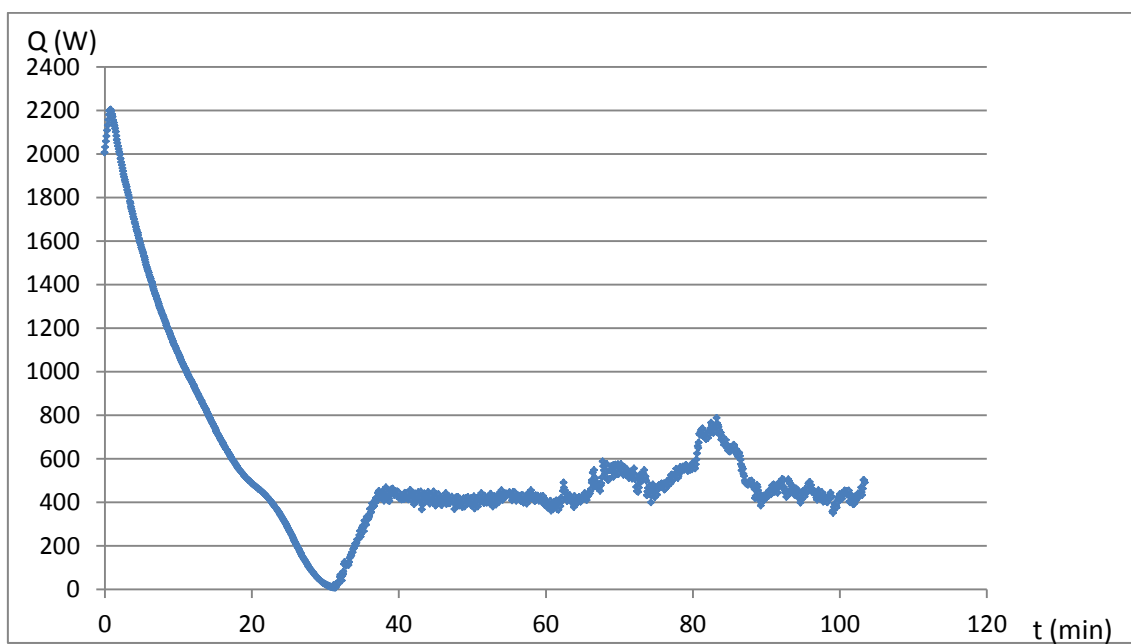
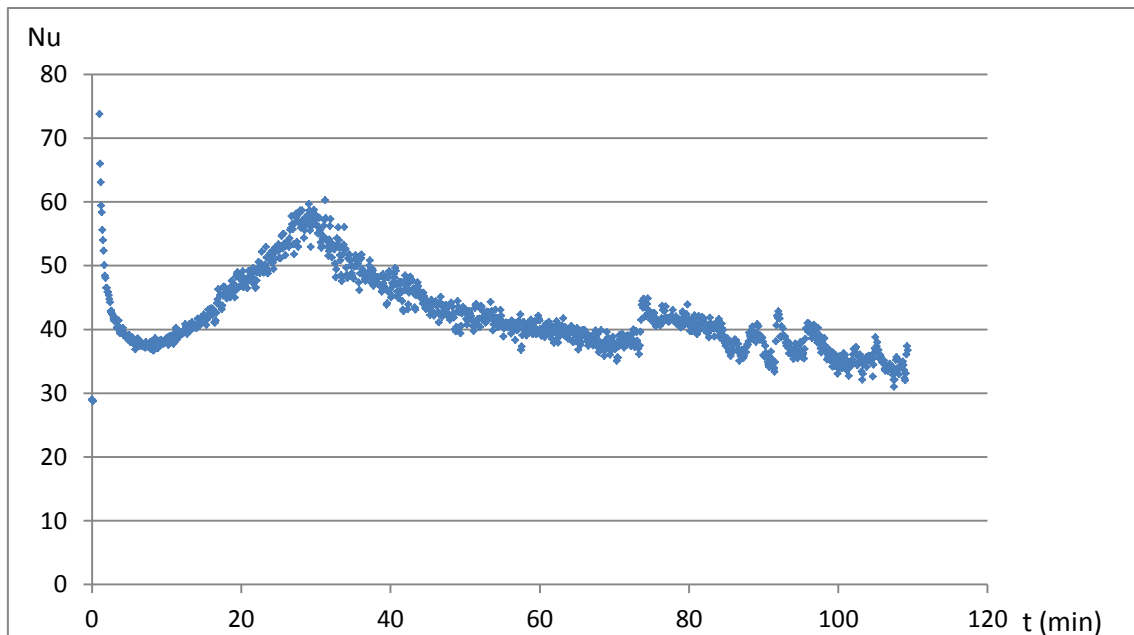


Figura 114: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 10 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C



*Figura 115: Número de Nusselt a 10 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C*

Para este ensayo, el instante en el que comienza a producirse hielo es a los 29 minutos. Los valores que se alcanzan son de 1320 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 60 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 29 minutos es de 41 para el número de Nusselt y 1023 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 2204 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
29	60	41	1320	1023	2204

### 9.3. Ensayo 1C

Las revoluciones a las que se hace girar el sistema de raspado son 15 revoluciones por minuto. Las gráficas obtenidas son:

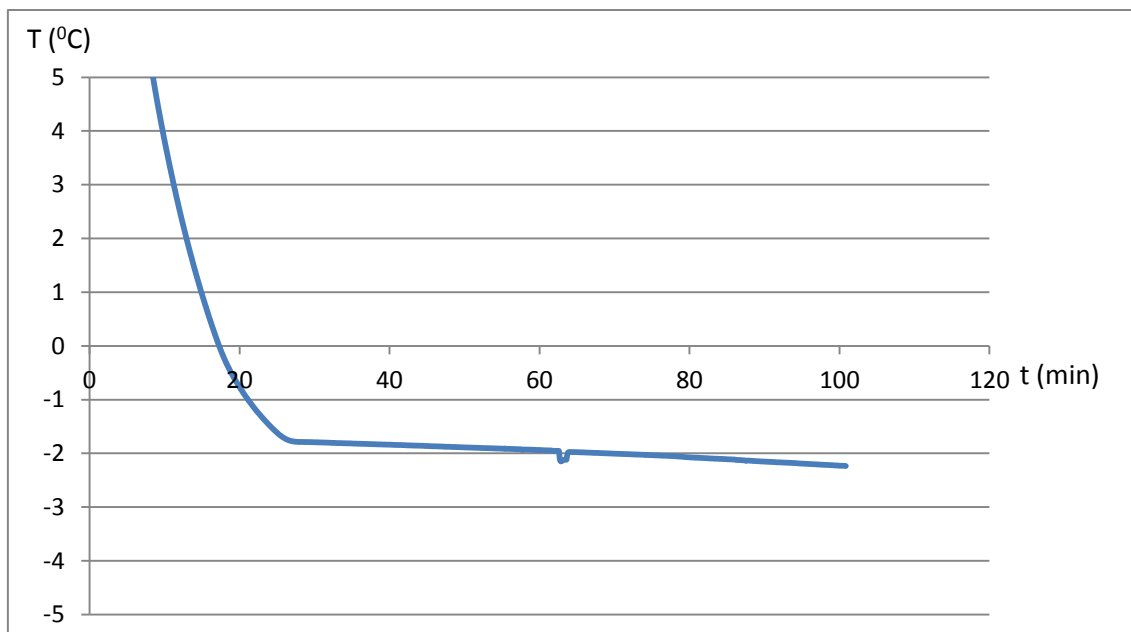


Figura 116: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 15 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

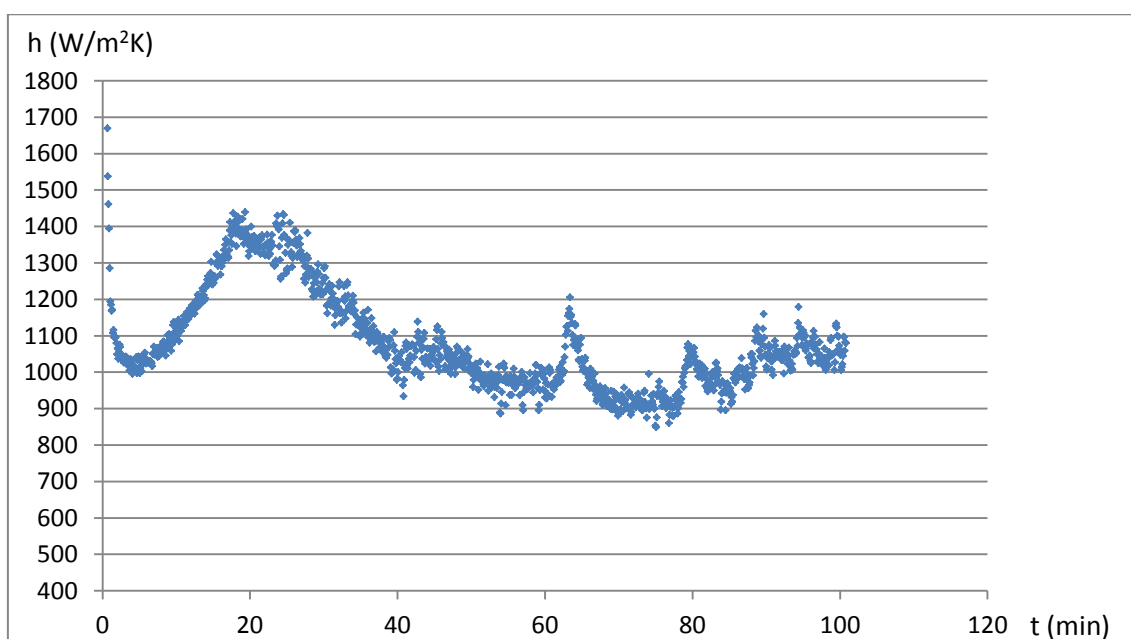


Figura 117: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 15 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

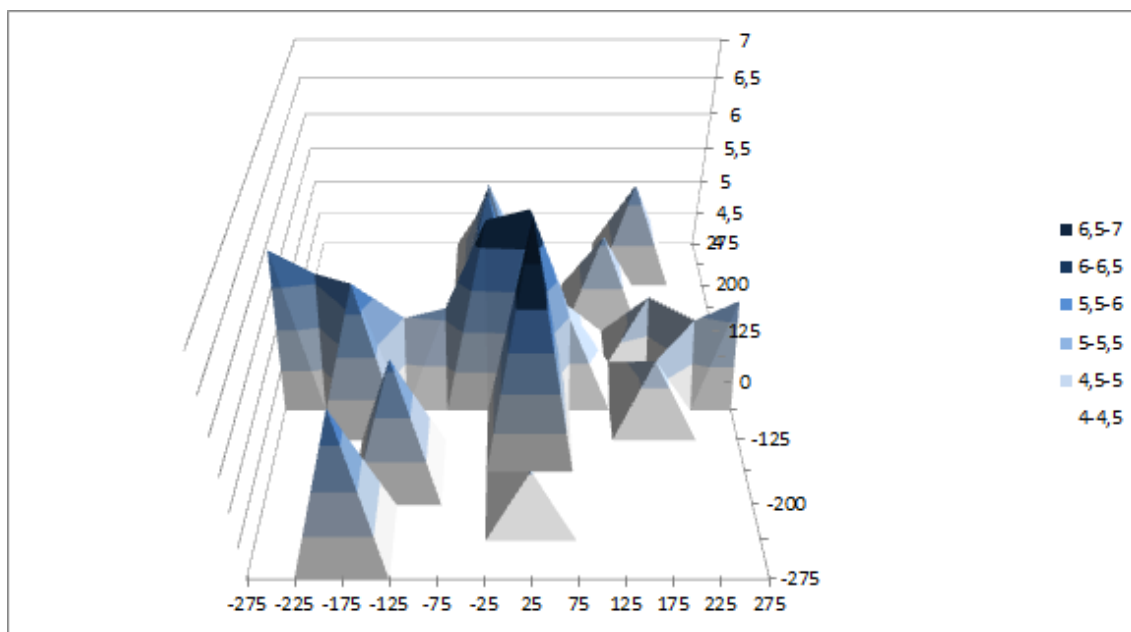


Figura 118: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 15 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

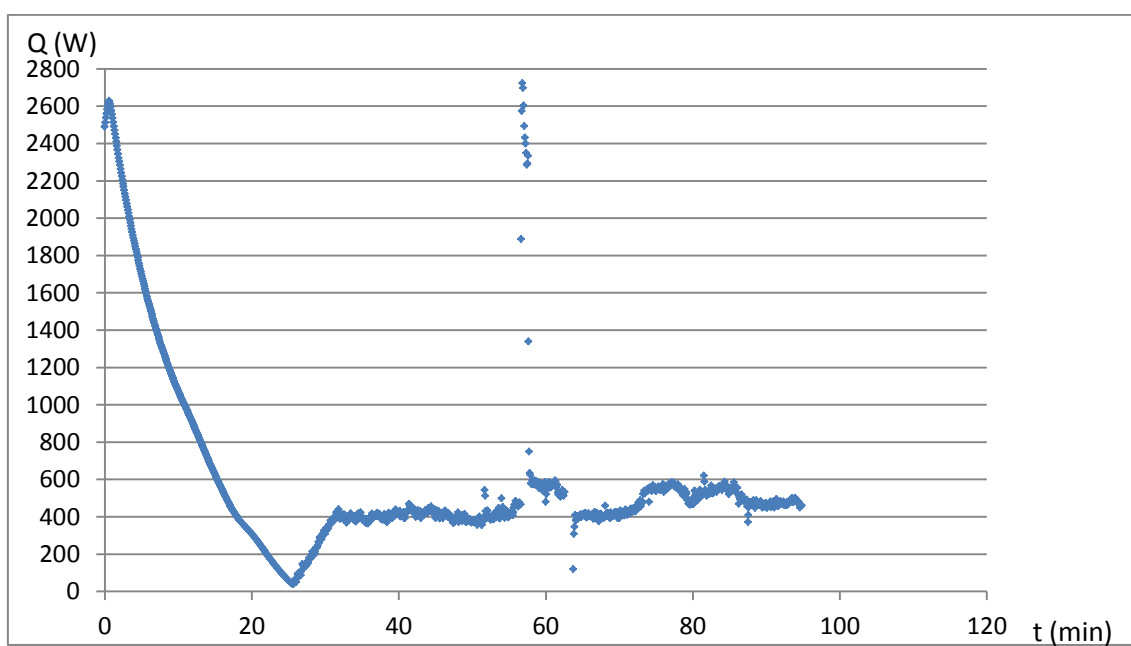


Figura 119: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 15 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

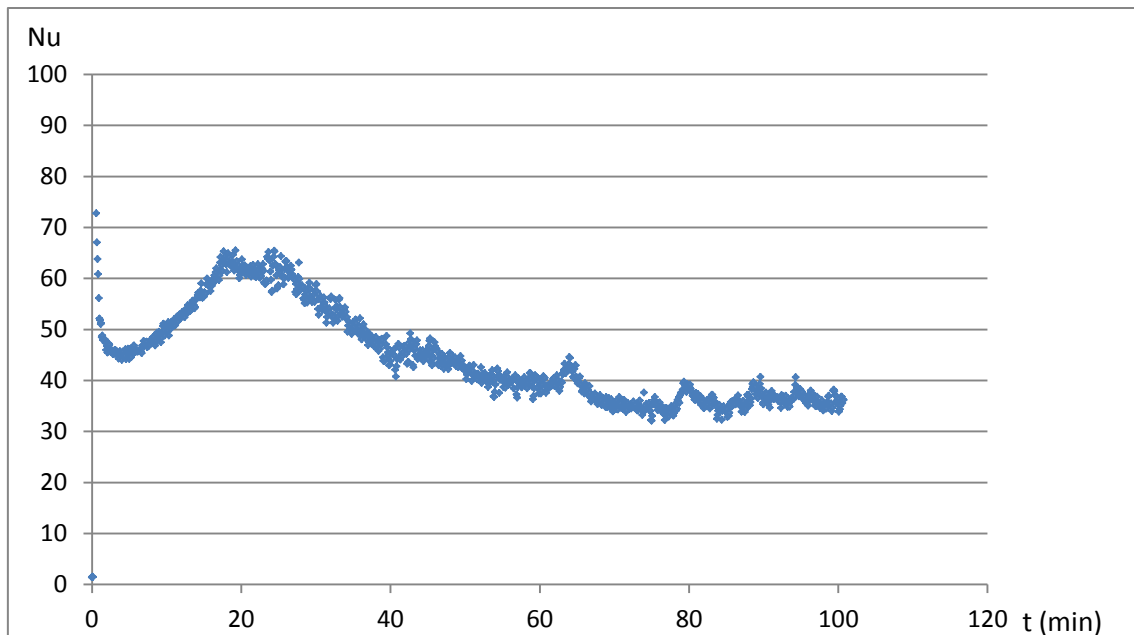


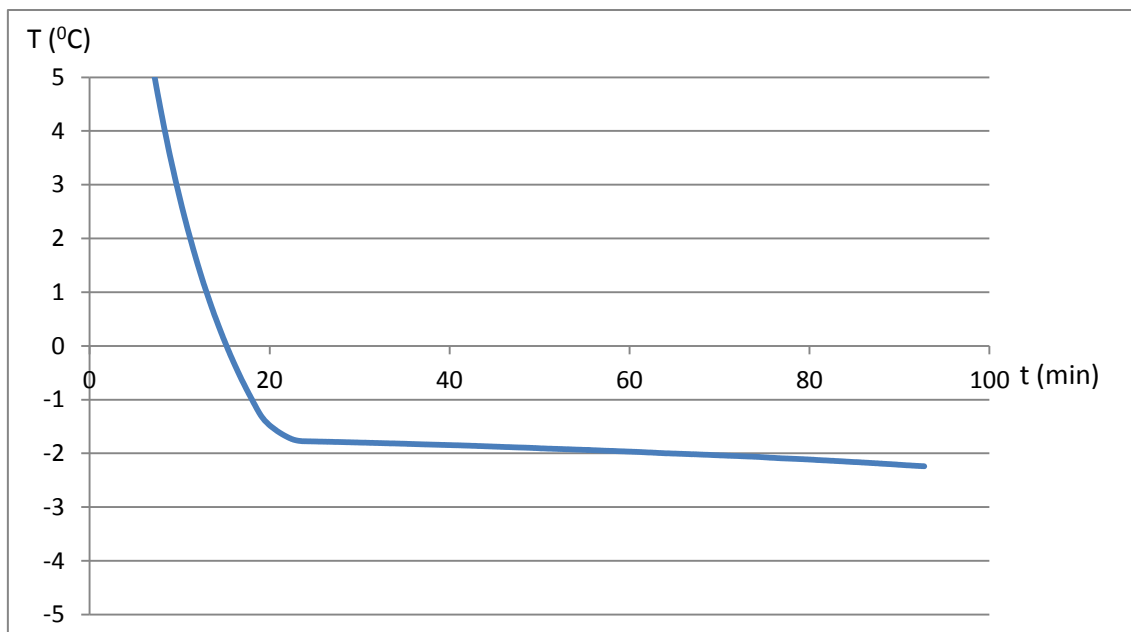
Figura 120: Número de Nusselt a 15 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

En este ensayo, el hielo comienza a aparecer a los 25 minutos. Los valores que se alcanzan son de 1439 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 63 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 25 minutos es de 39 para el número de Nusselt y 1042 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 2629 W.

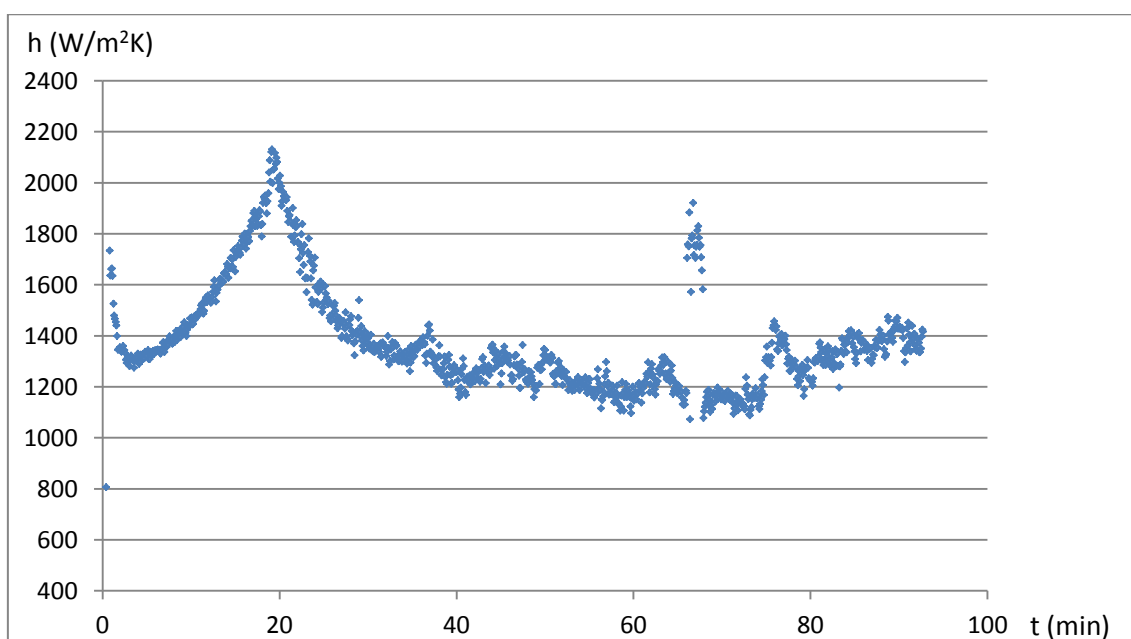
t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
25	63	39	1439	1042	2629

#### 9.4. Ensayo 1D

El régimen de giro impuesto para este ensayo es ahora de 30 revoluciones por minuto, y las representaciones gráficas las siguientes:



*Figura 121: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 30 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9 $^{\circ}\text{C}$*



*Figura 122: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 30 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9 $^{\circ}\text{C}$*

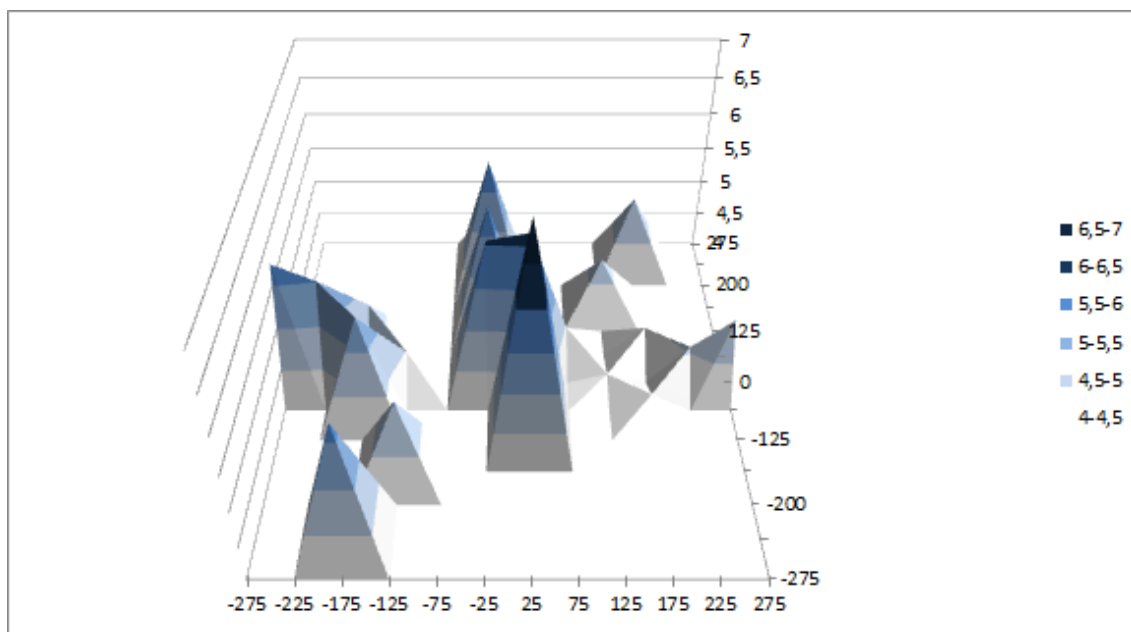


Figura 123: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 30 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

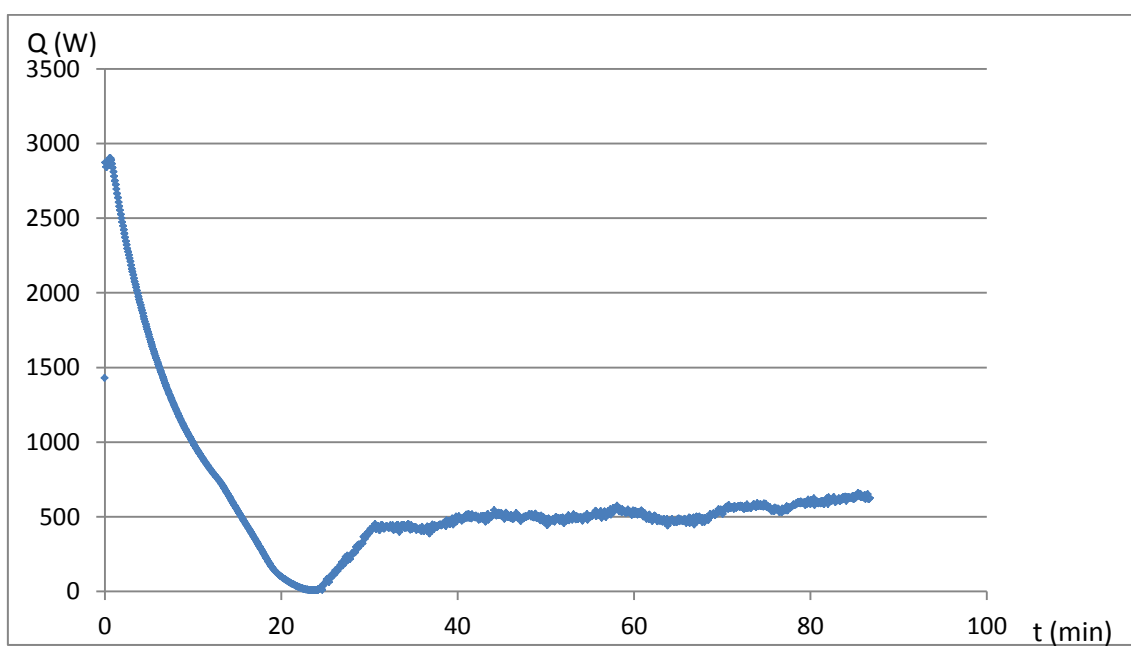


Figura 124: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 30 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

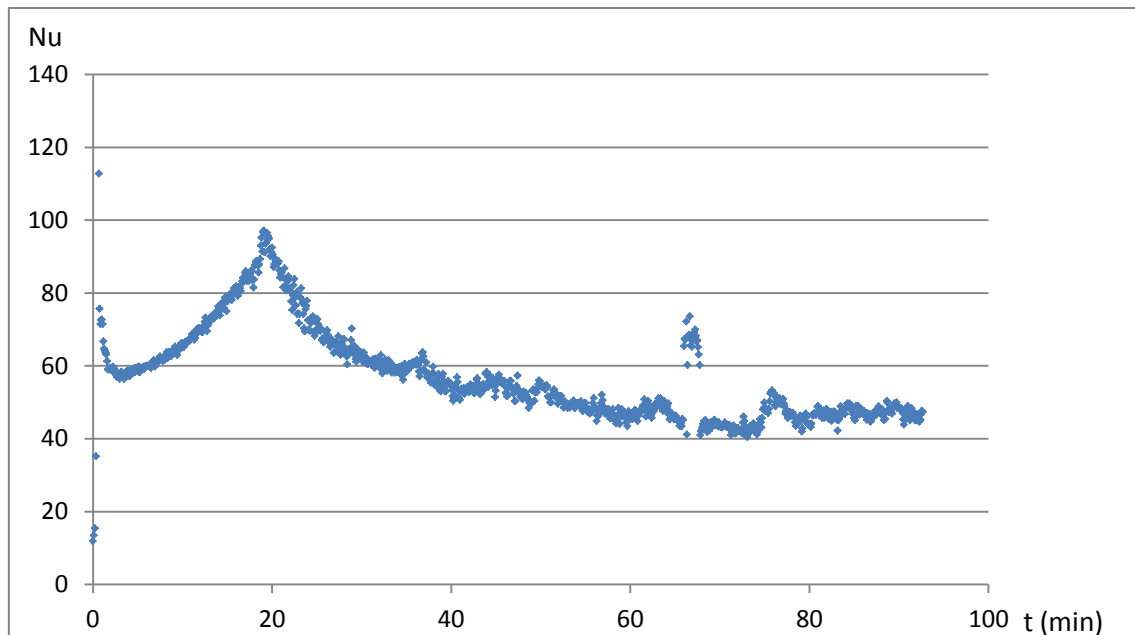


Figura 125: Número de Nusselt a 30 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

La aparición de hielo se produce a los 21 minutos. Los valores que se alcanzan son de 2130 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 95 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 21 minutos es de 49 para el número de Nusselt y 1324 W/K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 2902 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
21	95	49	2130	1324	2902

## 9.5. Ensayo 1E

Se toma como régimen de giro el último de estudio, el que corresponde a 50 rpm. Las gráficas obtenidas son:



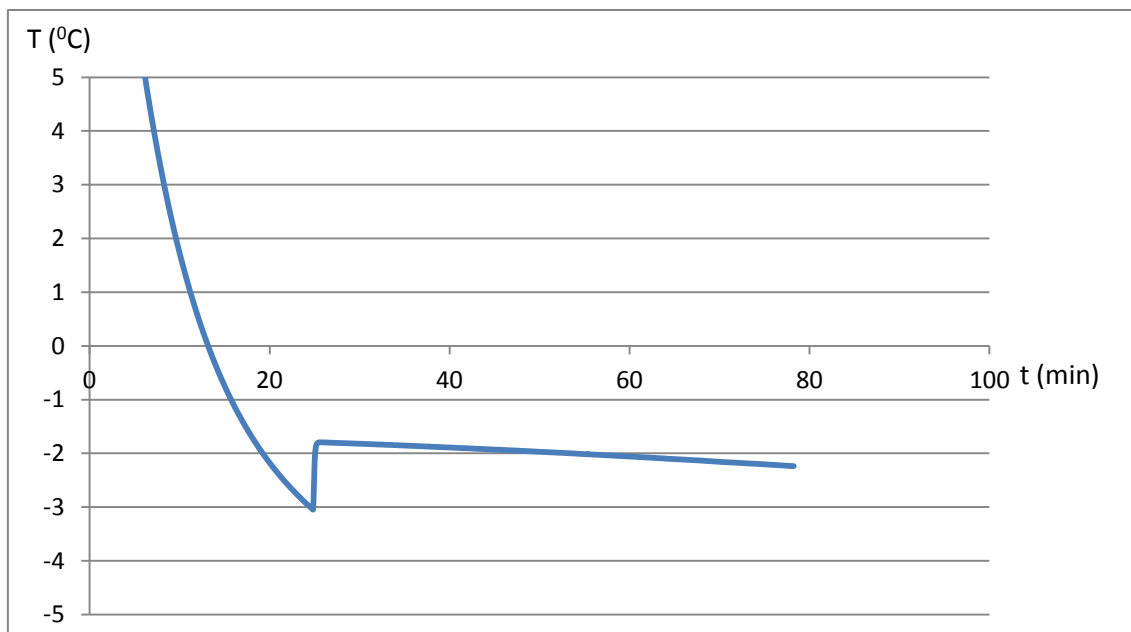


Figura 126: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 50 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

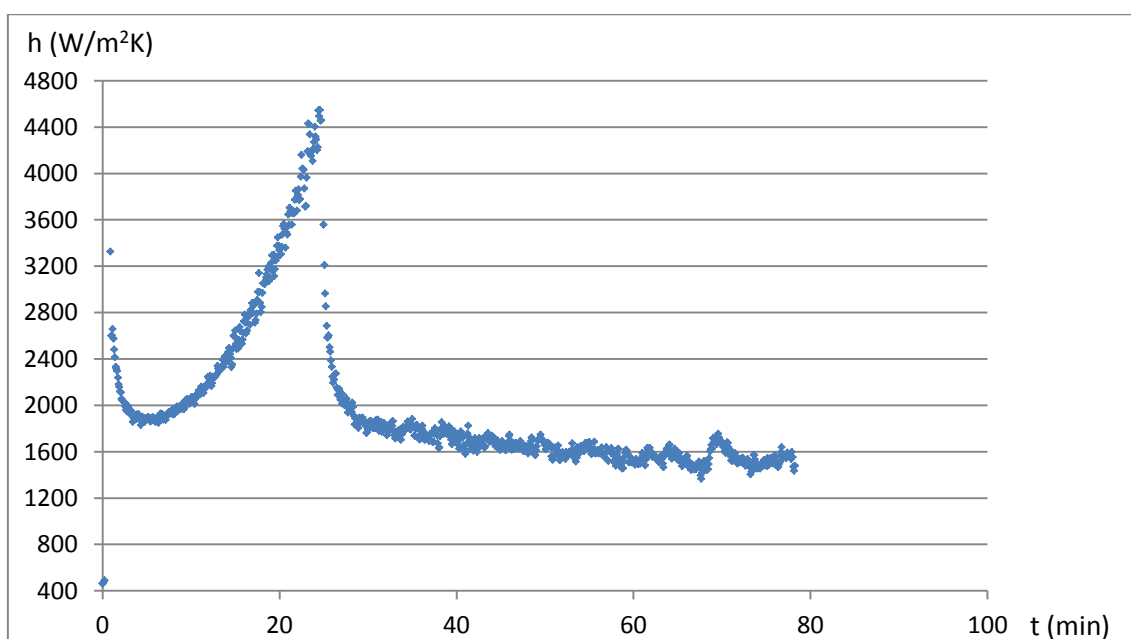


Figura 127: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 50 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

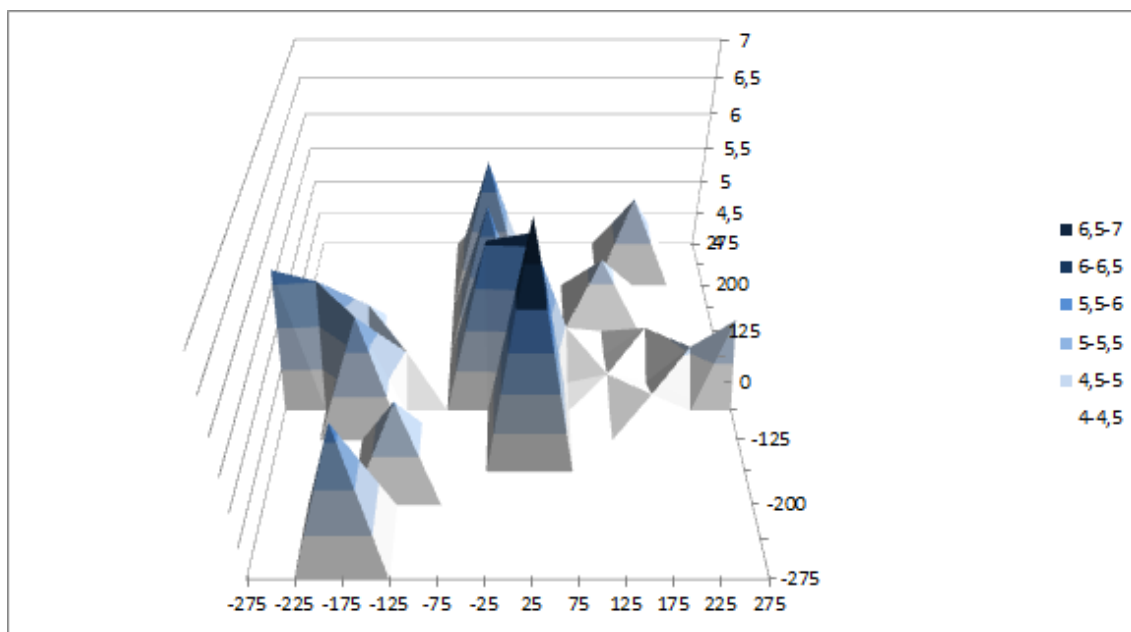


Figura 128: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 50 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

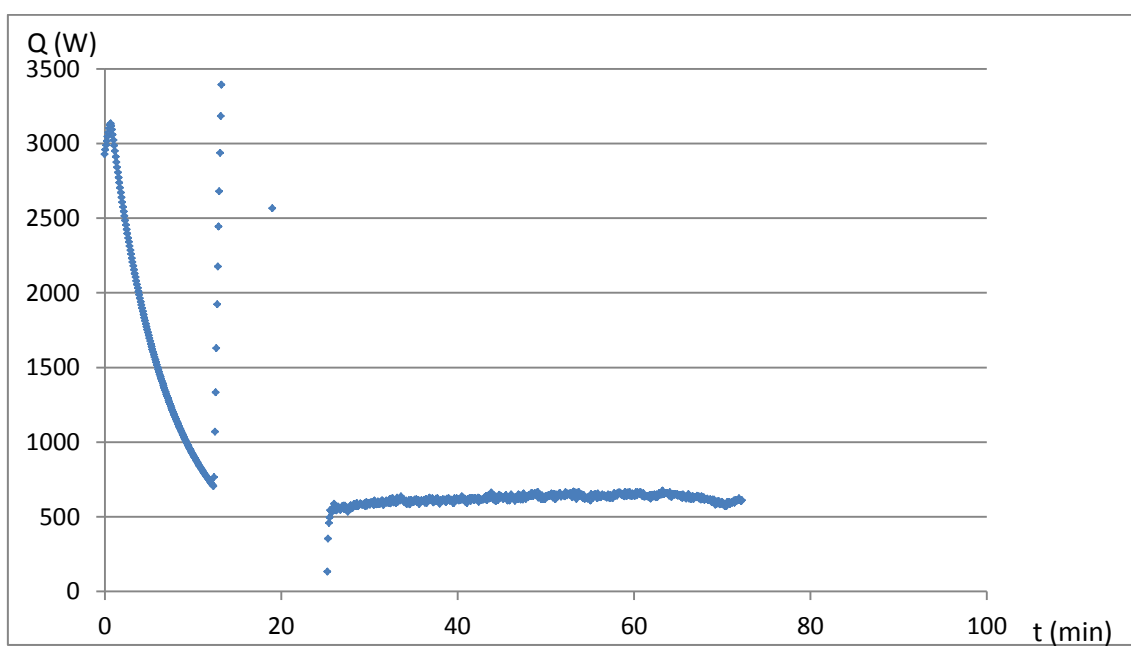


Figura 129: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 50 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

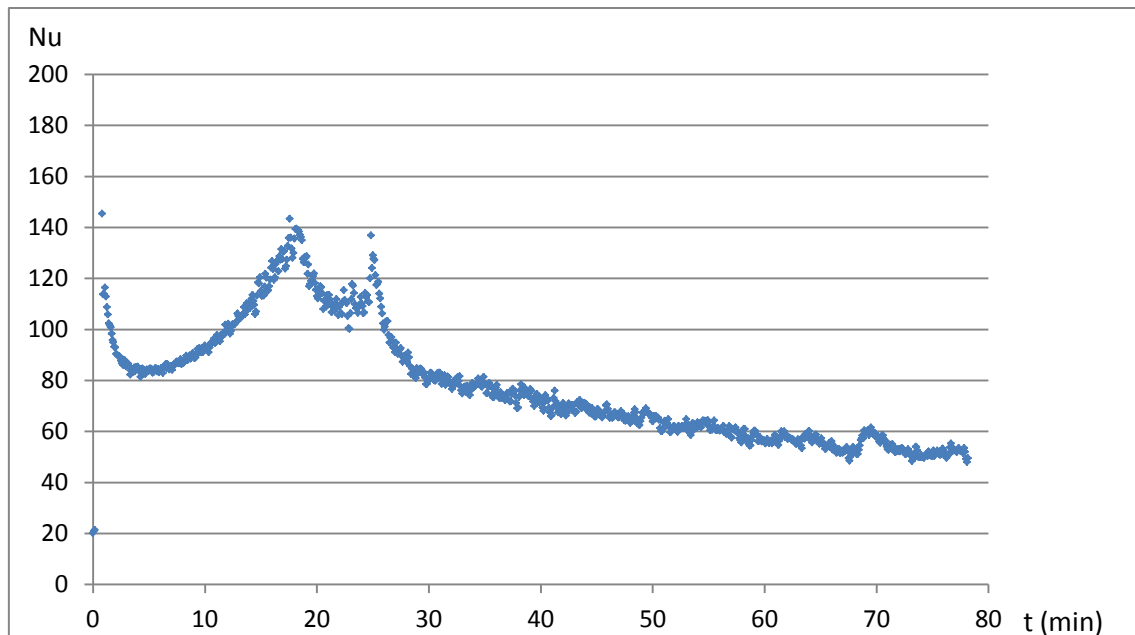


Figura 130: Número de Nusselt a 50 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 4.9°C

El hielo comienza a aparecer a los 25 minutos. Se aprecia además un pico por el proceso de subenfriamiento, bajando inicialmente la temperatura muy por debajo del punto de congelación, y posteriormente aumentando hasta estabilizarse en su temperatura de congelación. Los valores que se alcanzan son de 4543 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 143 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 25 minutos es de 63 para el número de Nusselt y 1715 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 3133 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
25	143	63	4543	1715	3133

## 9.6. Ensayo 2A

Las condiciones de partida son las mismas que en los ensayos anteriores, salvo que se introduce la variante del salto de temperatura entre la temperatura de la disolución de cloruro cálcico en el tanque de amortiguamiento y la temperatura de congelación de la disolución de cloruro

sódico. En este caso, el salto de temperatura es menor, de  $2.5^{\circ}\text{C}$ , ya que en los ensayos anteriores el salto era de  $4.9^{\circ}\text{C}$ . Las gráficas obtenidas son:

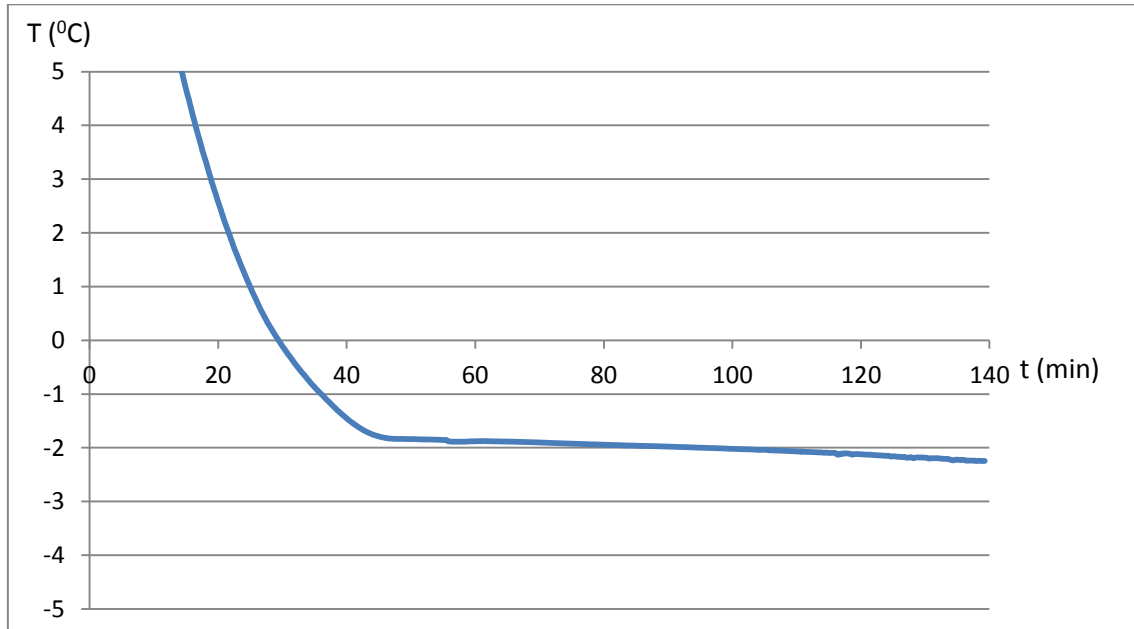


Figura 131: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 5 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

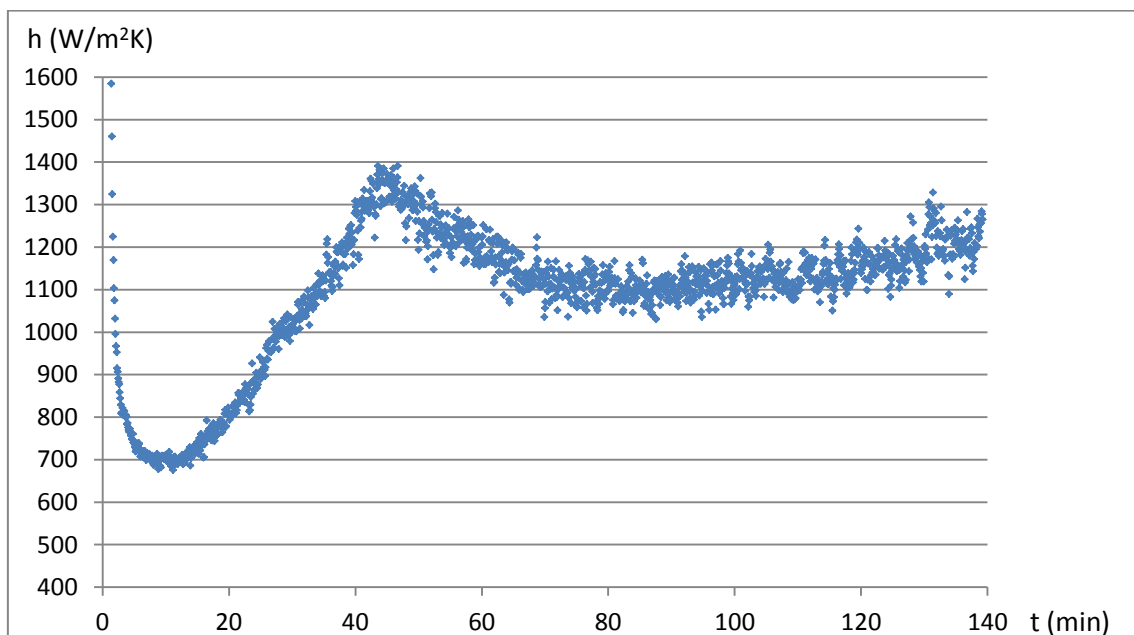


Figura 132: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 5 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

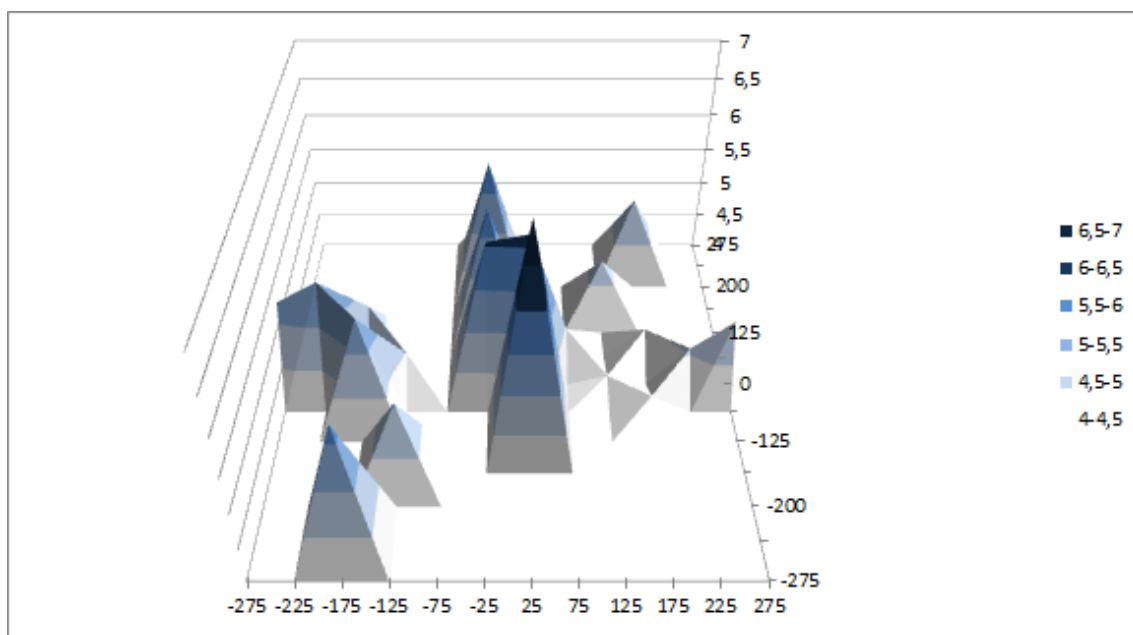


Figura 133: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 5 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

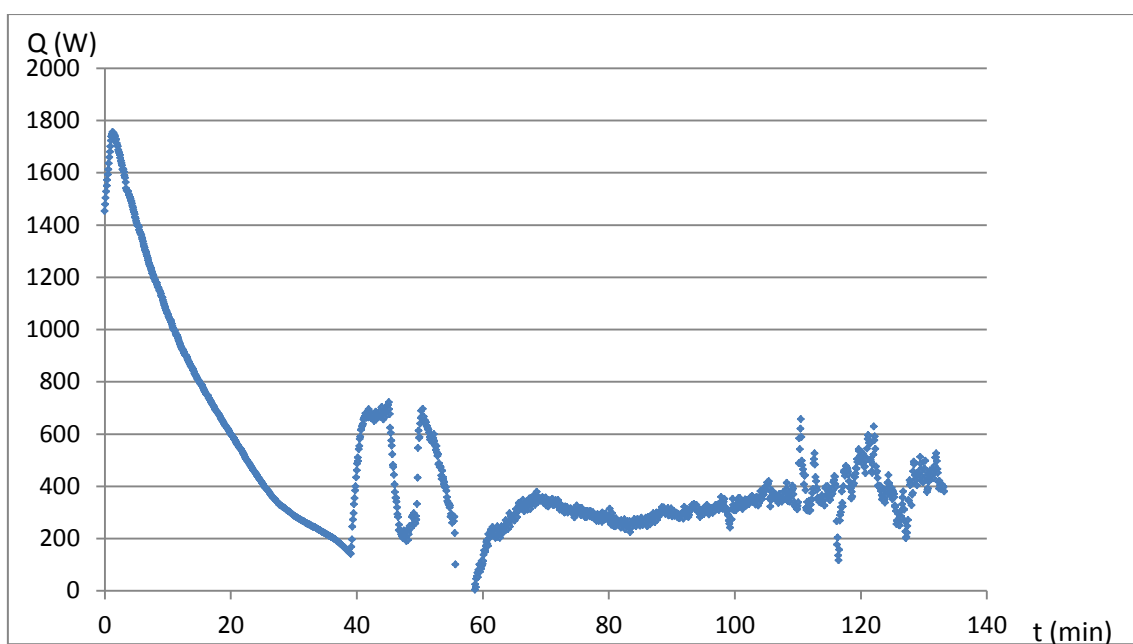


Figura 134: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 5 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

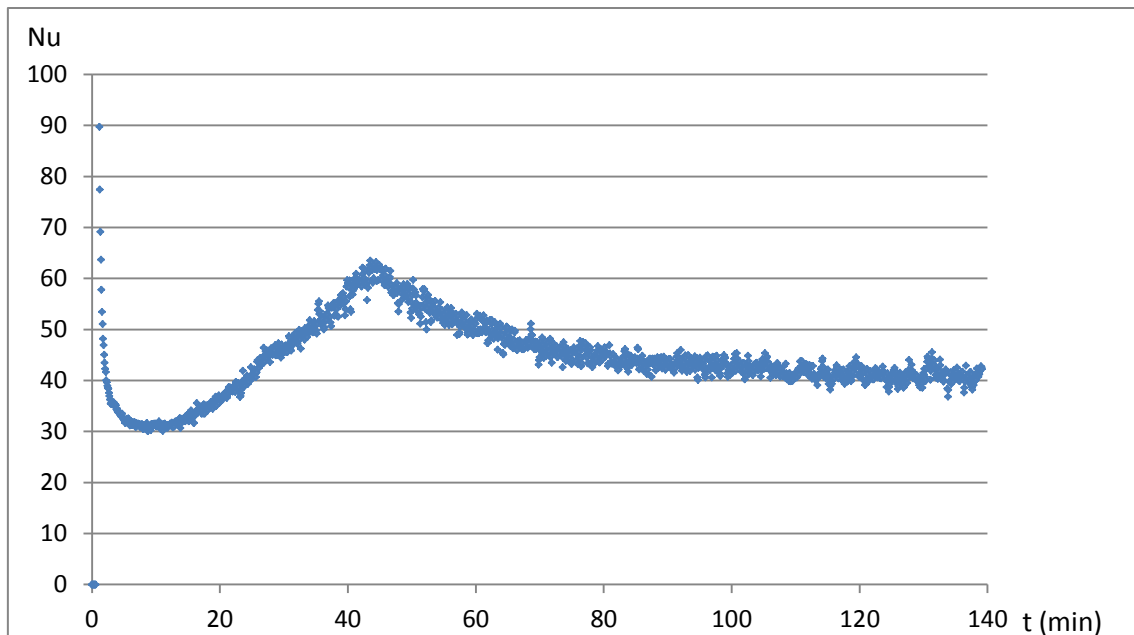


Figura 135: Número de Nusselt a 5 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

El hielo se genera a los 43 minutos. Los valores que se alcanzan son de 1391 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 64 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 43 minutos es de 44 para el número de Nusselt y 1126 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 1126 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
43	64	44	1391	1126	1756

## 9.7. Ensayo 2B

La disolución de partida sigue siendo la misma (29.60 g/l). El régimen de giro impuesto ahora es mayor, 10 revoluciones por minuto.

De igual manera, las gráficas obtenidas son:

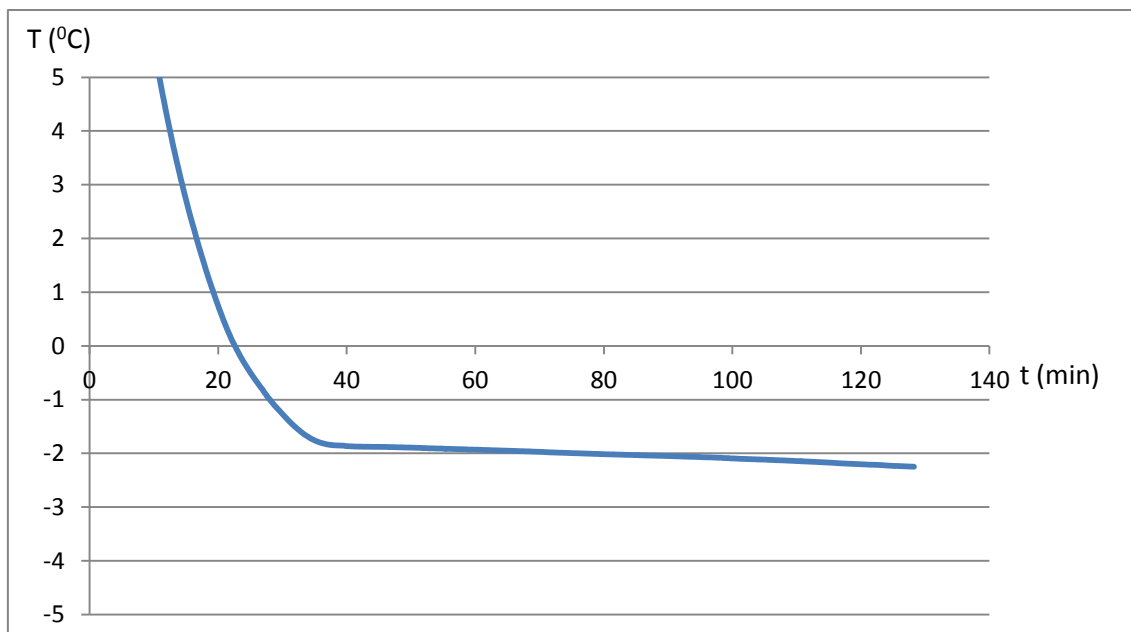


Figura 136: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 10 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5 $^{\circ}\text{C}$

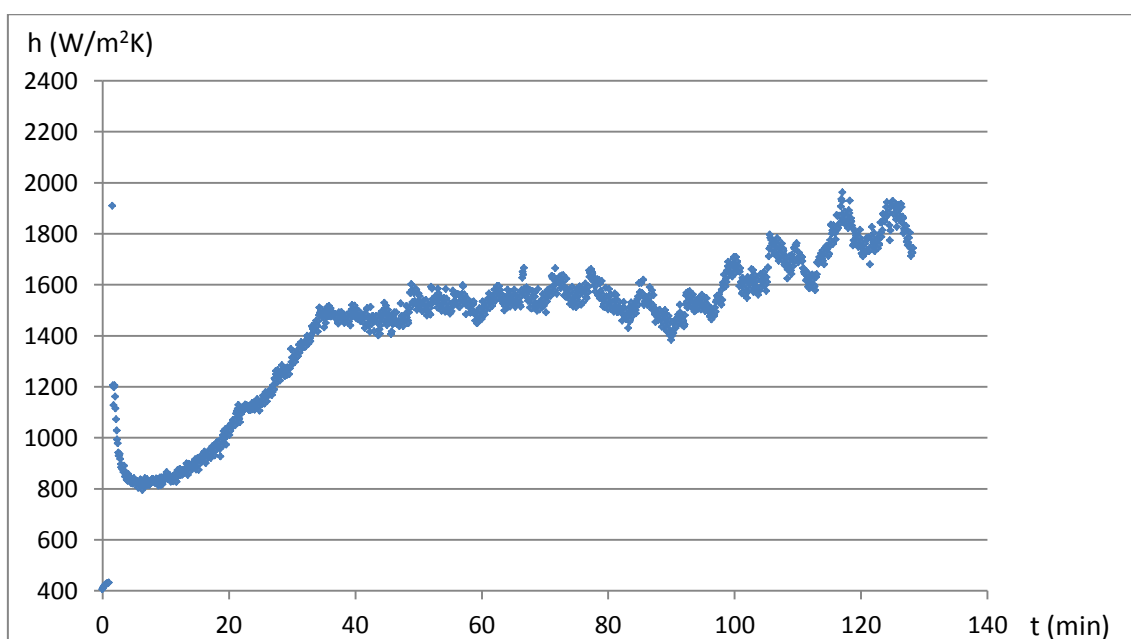


Figura 137: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 10 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5 $^{\circ}\text{C}$

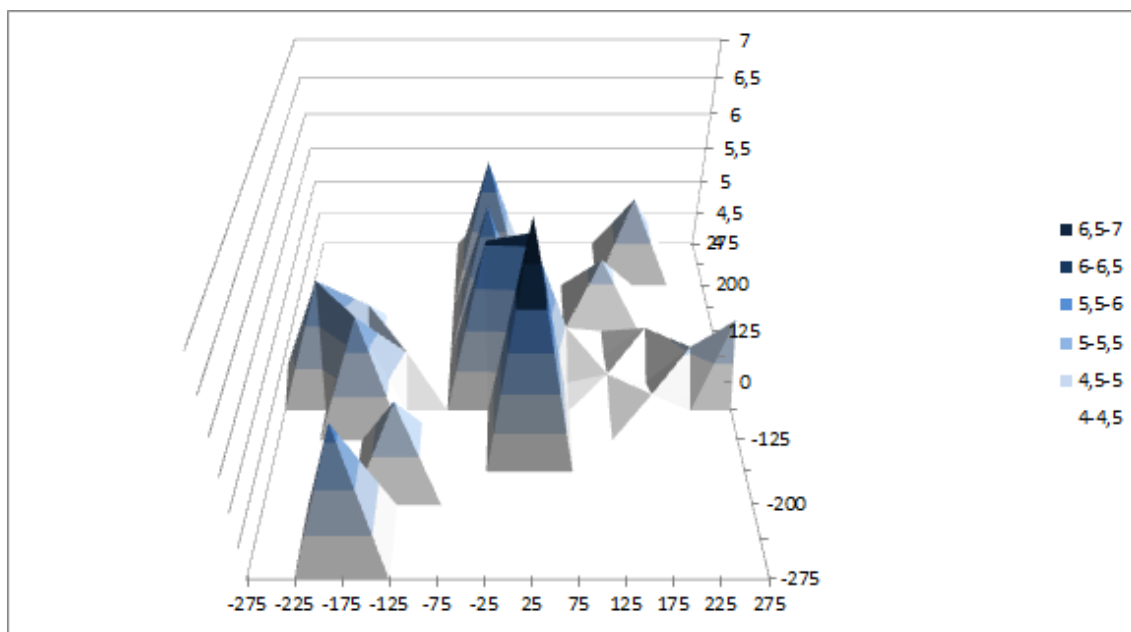


Figura 138: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 10 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

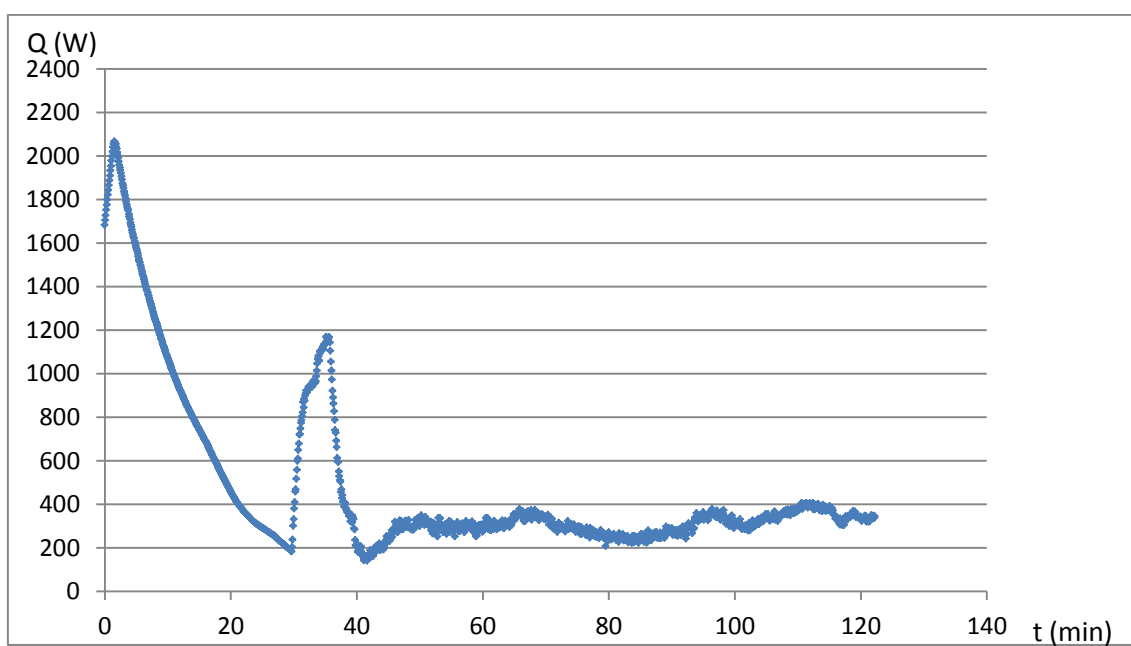
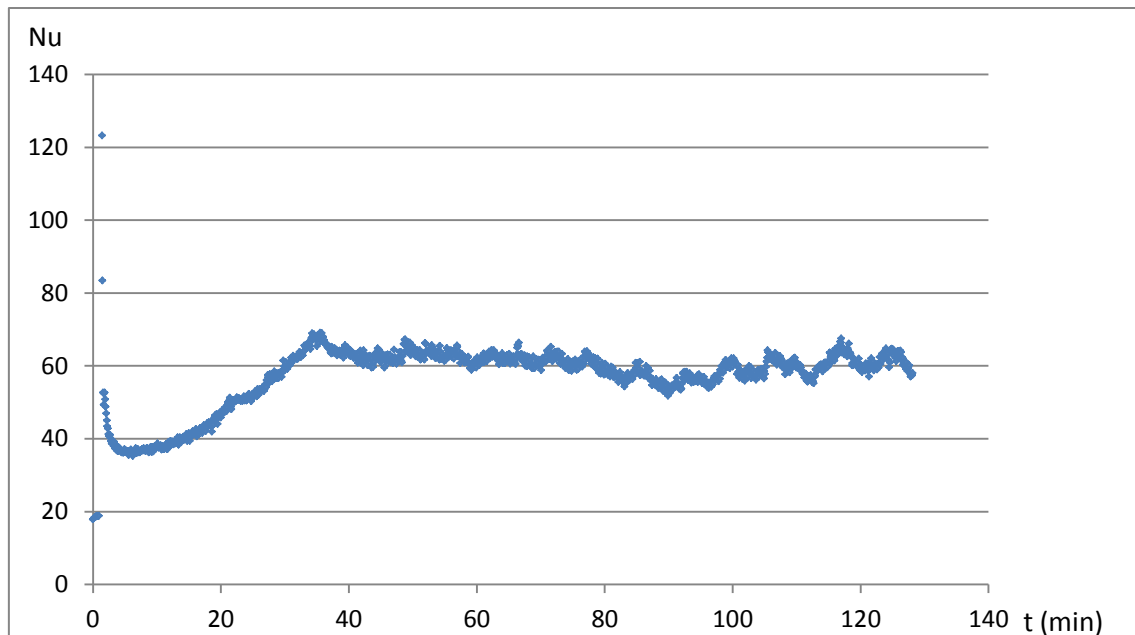


Figura 139: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 10 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C





*Figura 140: Número de Nusselt a 10 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>o</sup>C*

Para este ensayo, el hielo se genera a los 35 minutos. Los valores máximos que se alcanzan son de 1602 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor y 69 para el número de Nusselt. Los medios obtenidos son de 1517 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor y 61 para el número de Nusselt. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 2066 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
35	69	61	1602	1517	2066

## 9.8. Ensayo 2C

Las revoluciones a las que se hace girar el sistema de raspado son 15 revoluciones por minuto. Las gráficas obtenidas son:

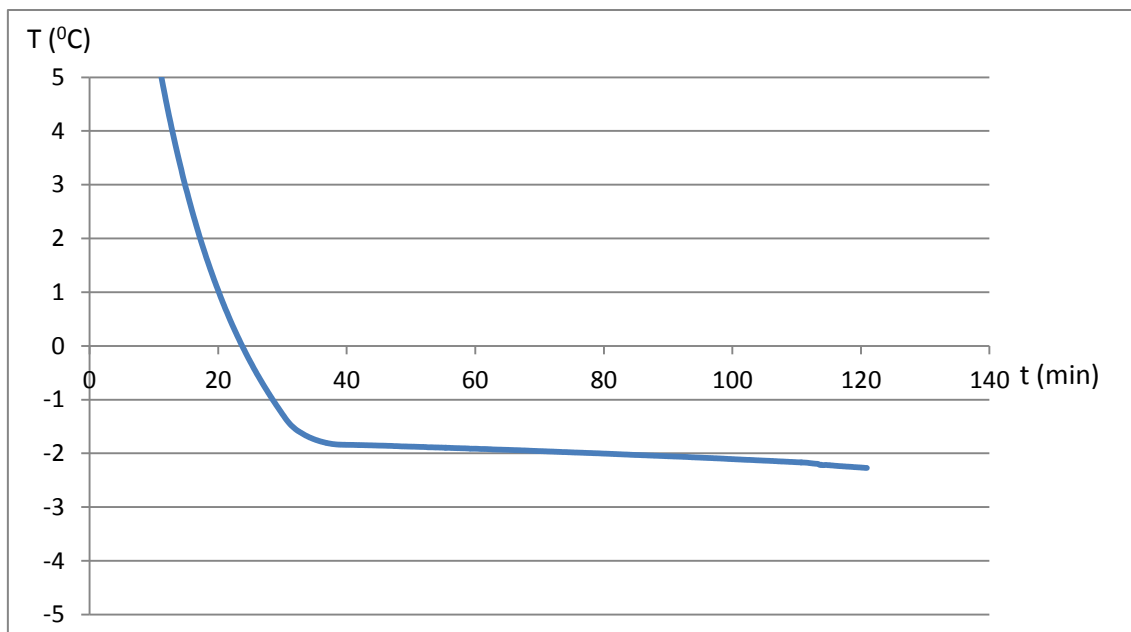


Figura 141: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 15 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

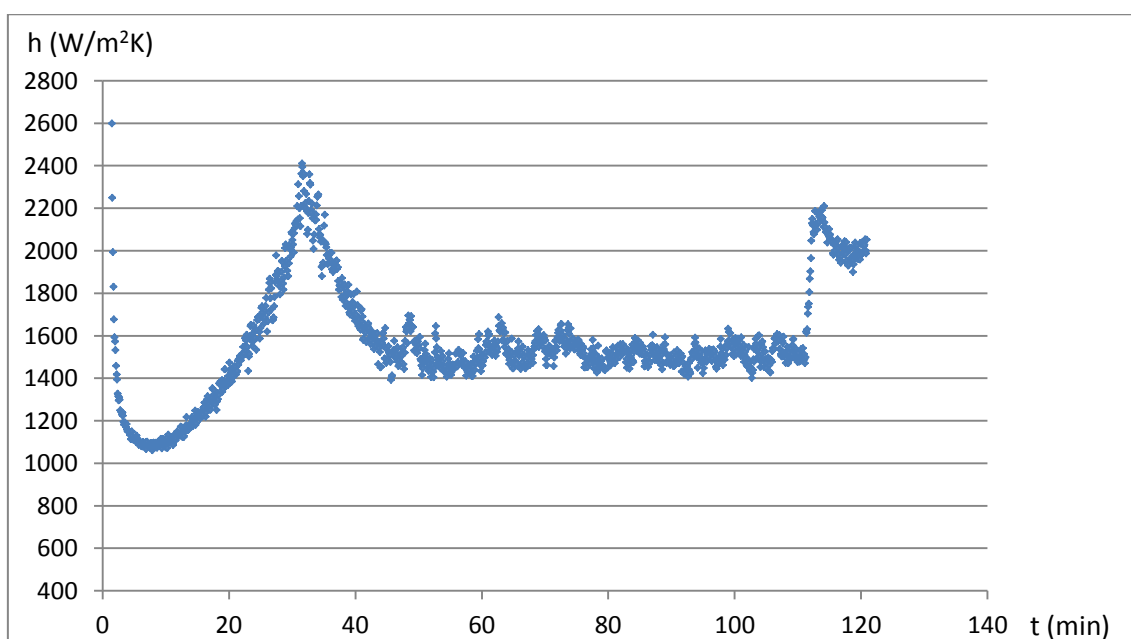


Figura 142: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 15 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

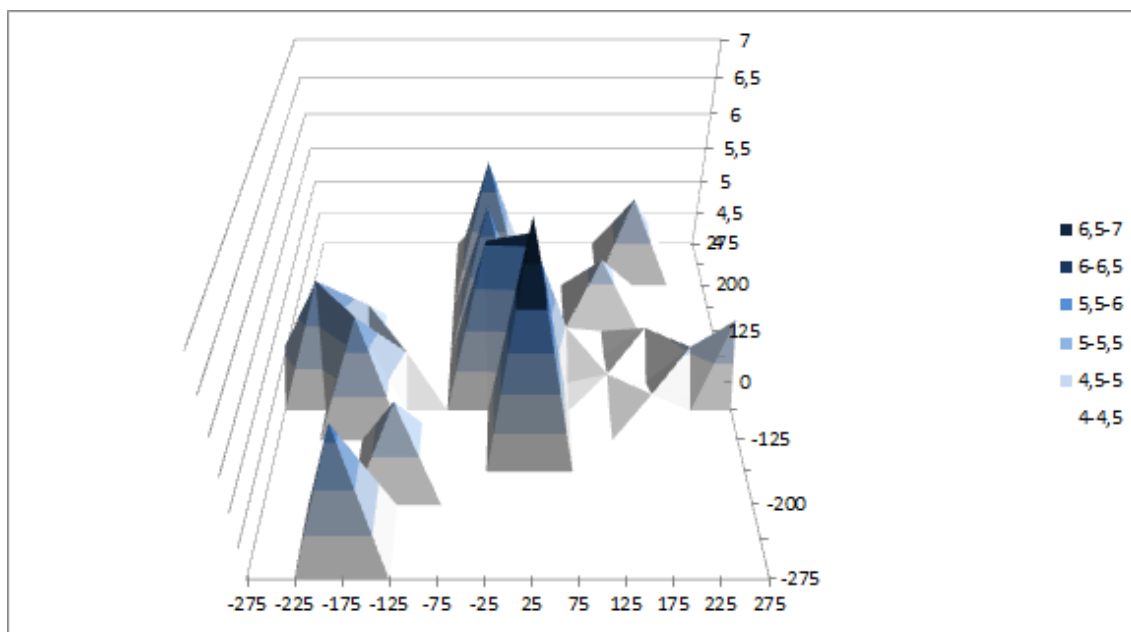


Figura 143: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 15 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

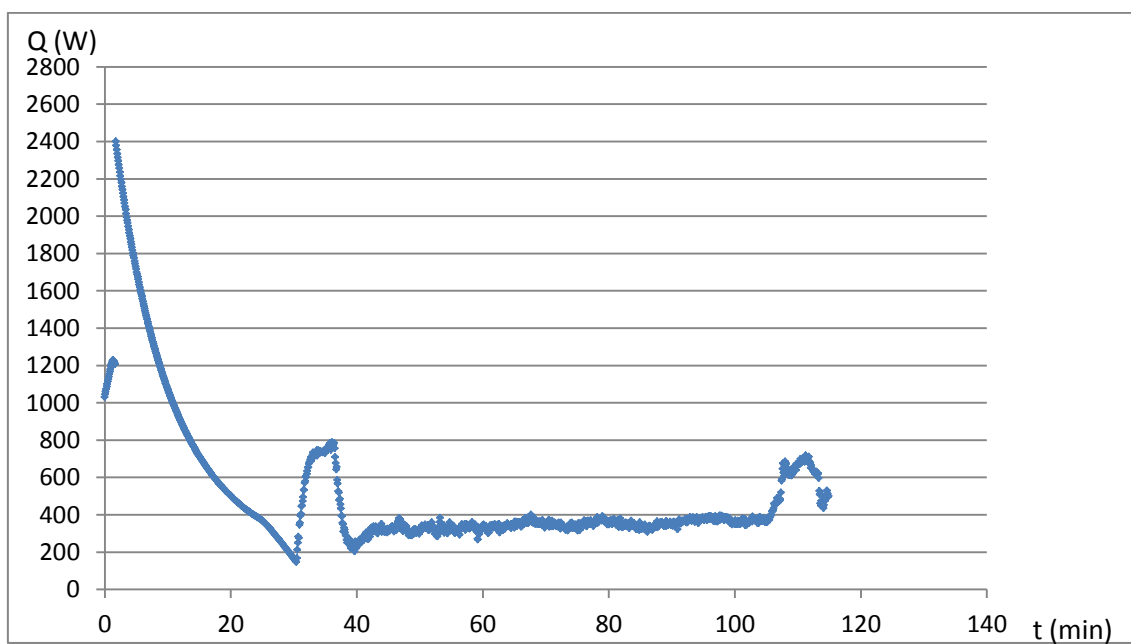


Figura 144: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 15 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

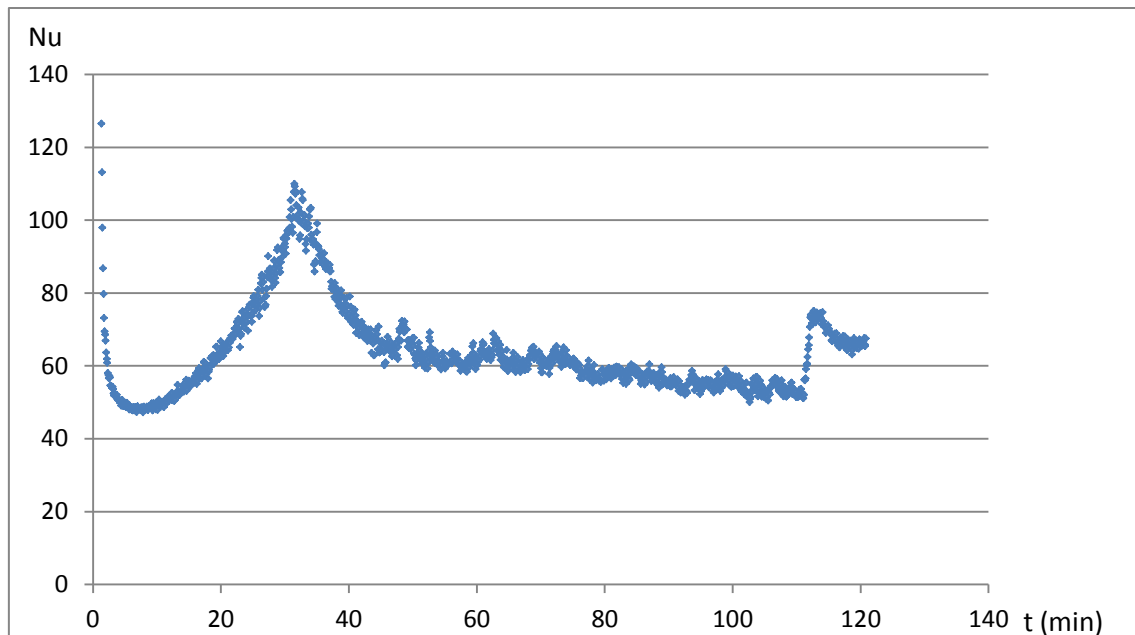


Figura 145: Número de Nusselt a 15 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

El hielo comienza a aparecer a los 33 minutos. Los valores que se alcanzan son de 2410 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 110 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 33 minutos es de 61 para el número de Nusselt y 1522 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 2401 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
33	110	61	2410	1522	2401

## 9.9. Ensayo 2D

Las revoluciones impuestas para este ensayo son ahora de 30 revoluciones por minuto, y las representaciones gráficas las siguientes:

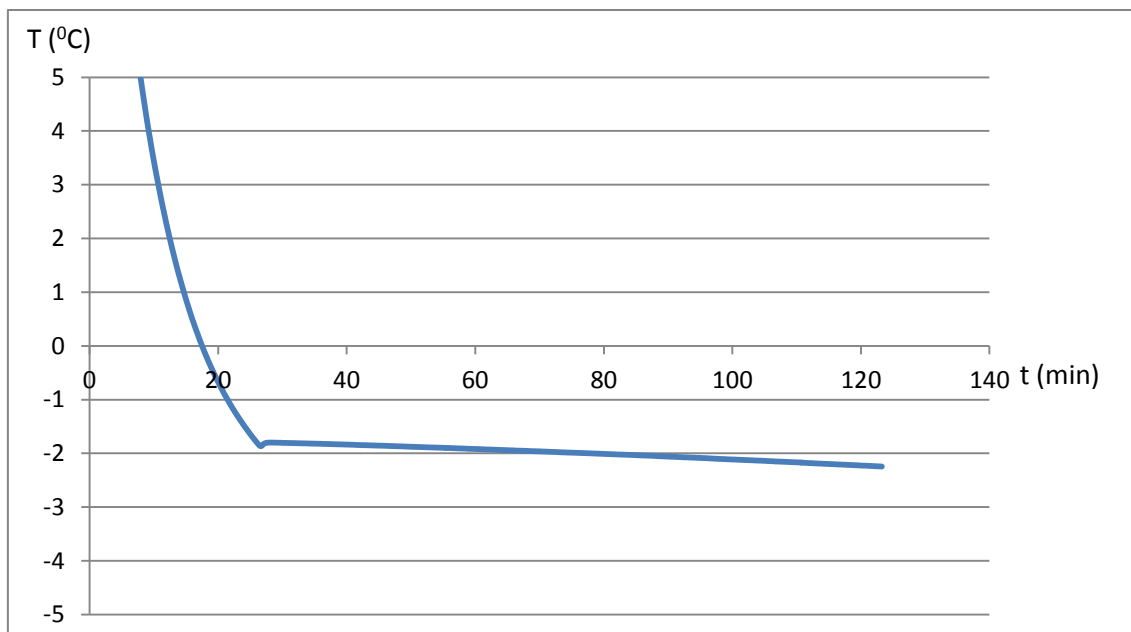


Figura 146: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 30 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

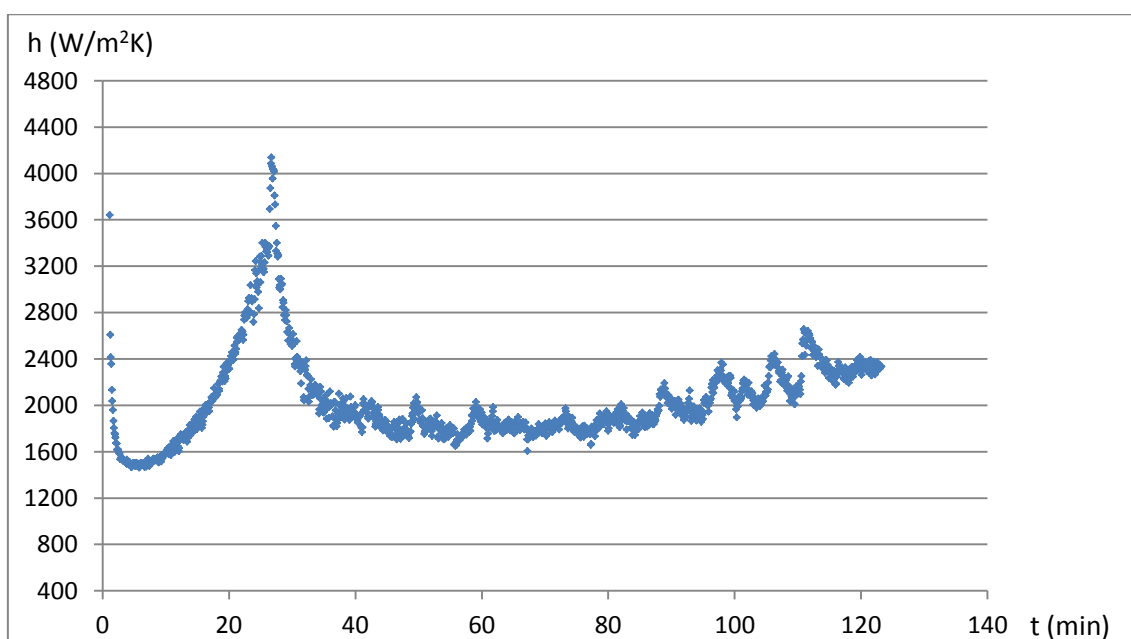


Figura 147: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 30 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

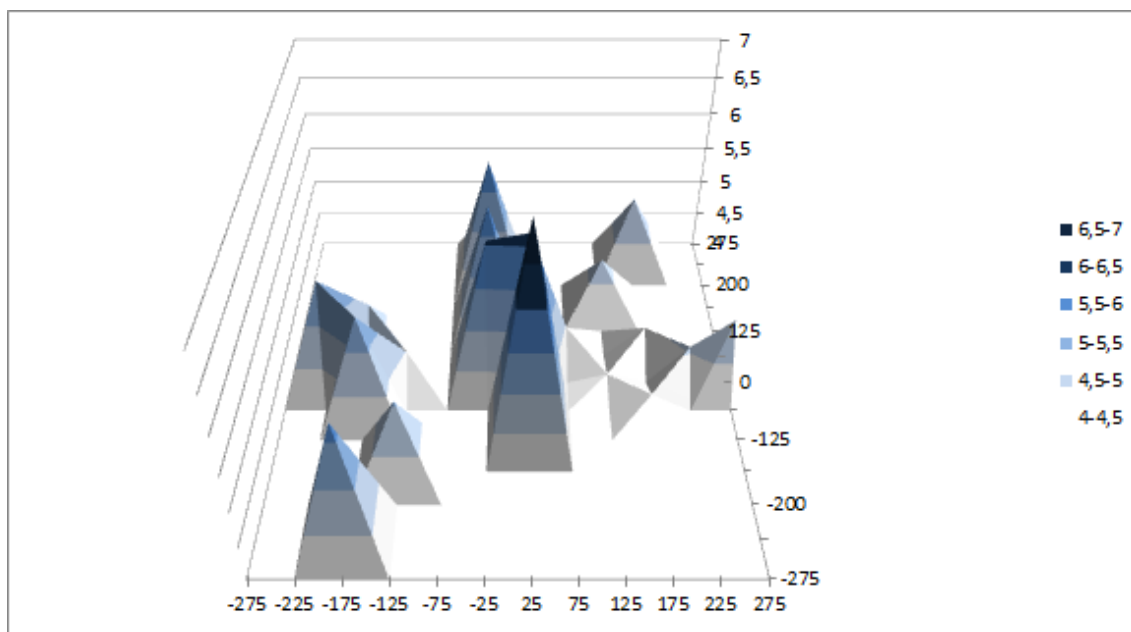


Figura 148: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 30 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

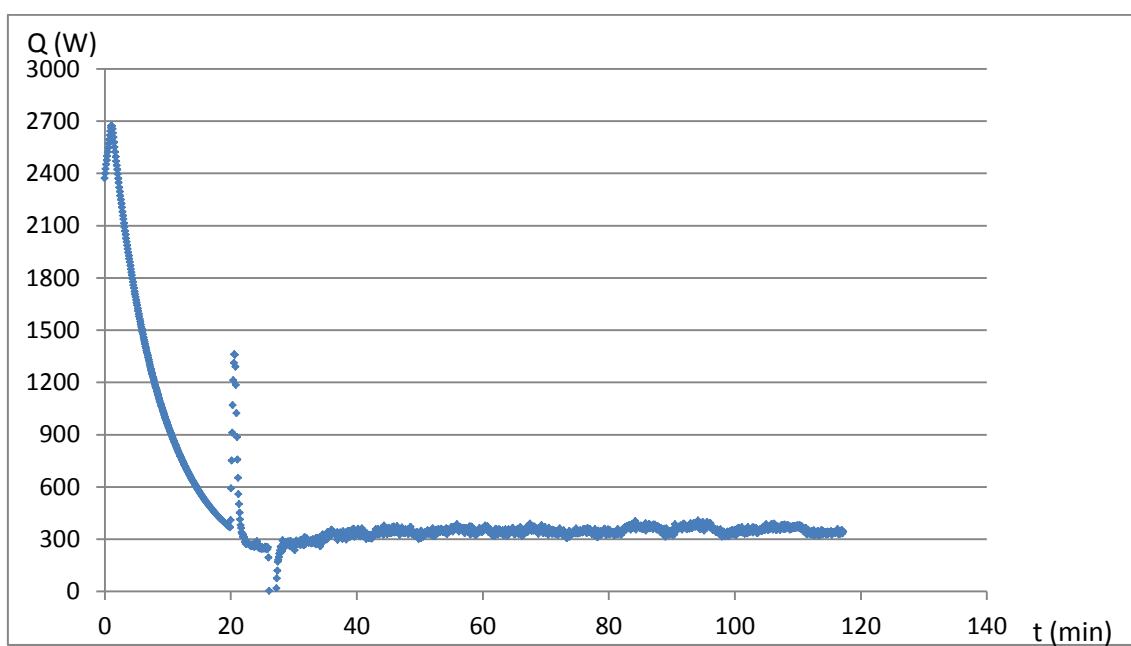


Figura 149: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 30 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

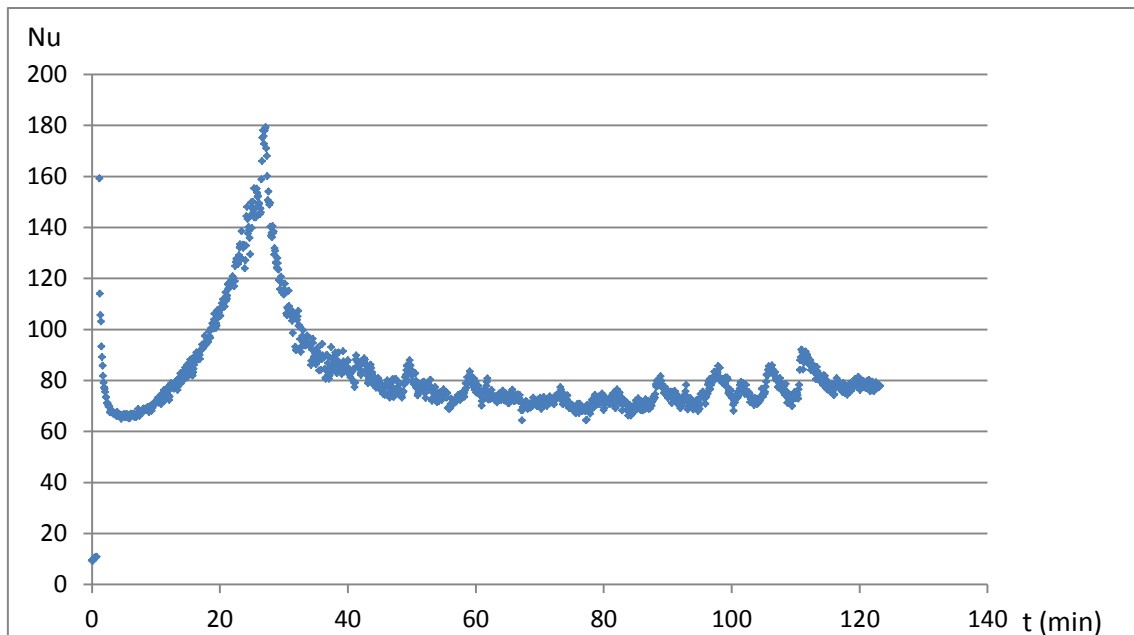


Figura 150: Número de Nusselt a 30 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

El hielo comienza a aparecer a los 25 minutos. Se aprecia además un pico por el proceso de subenfriamiento. Los valores que se alcanzan son de 4138 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 160 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 25 minutos es de 76 para el número de Nusselt y 1931 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 2674 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
25	160	76	4138	1931	2674

## 9.10. Ensayo 2E

Se toma como régimen de giro el último de estudio, el que corresponde a 50 rpm. Las gráficas obtenidas son:

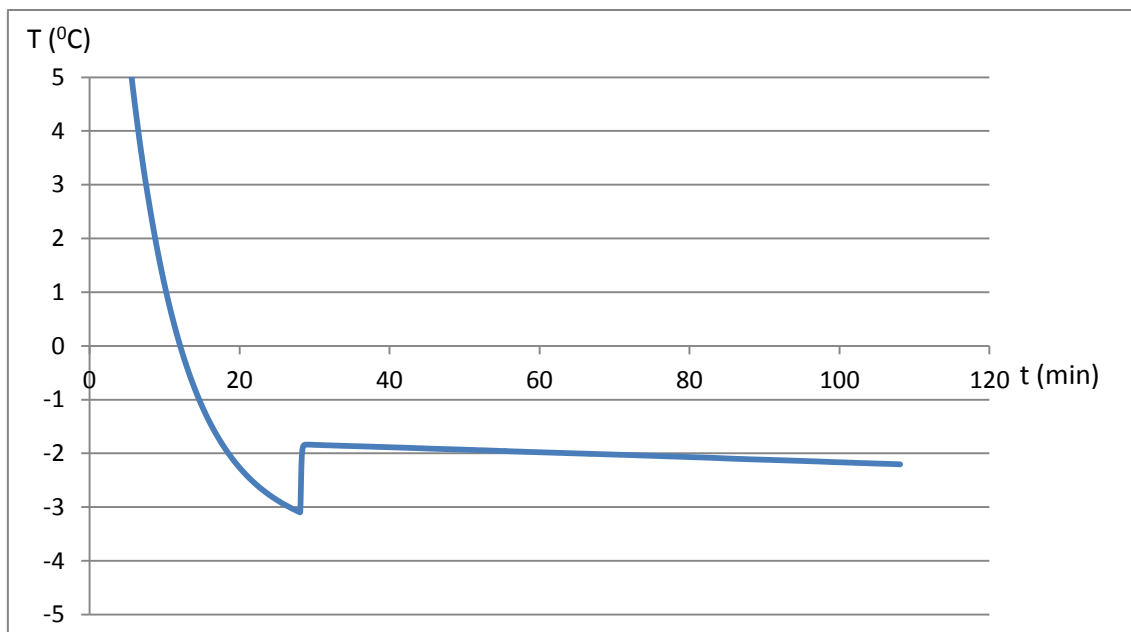


Figura 151: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 50 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

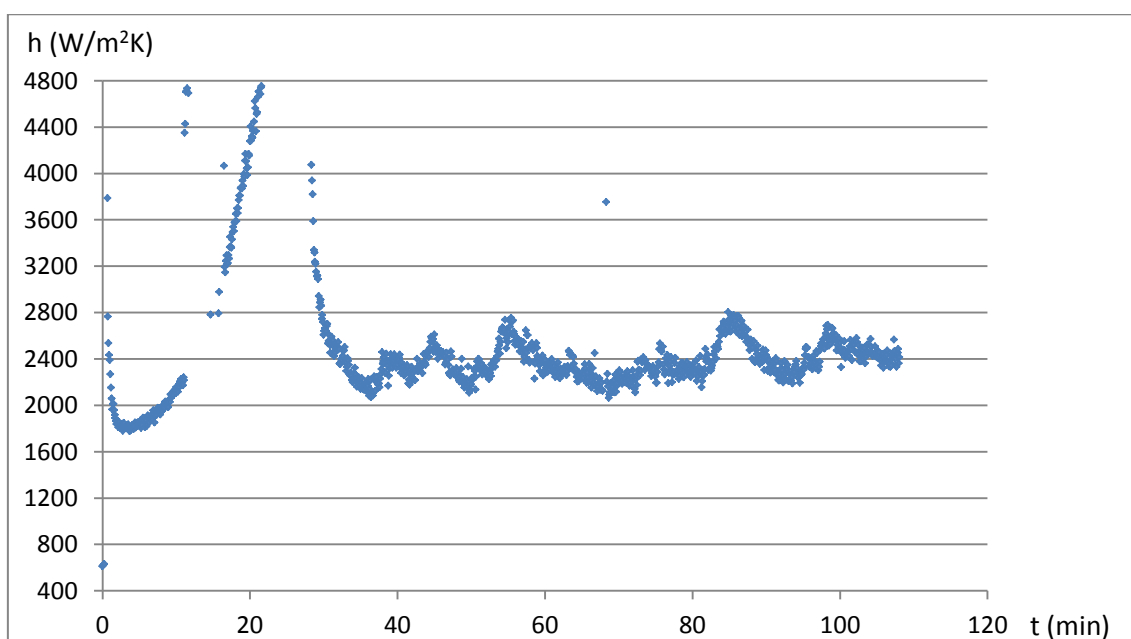


Figura 152: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 50 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$



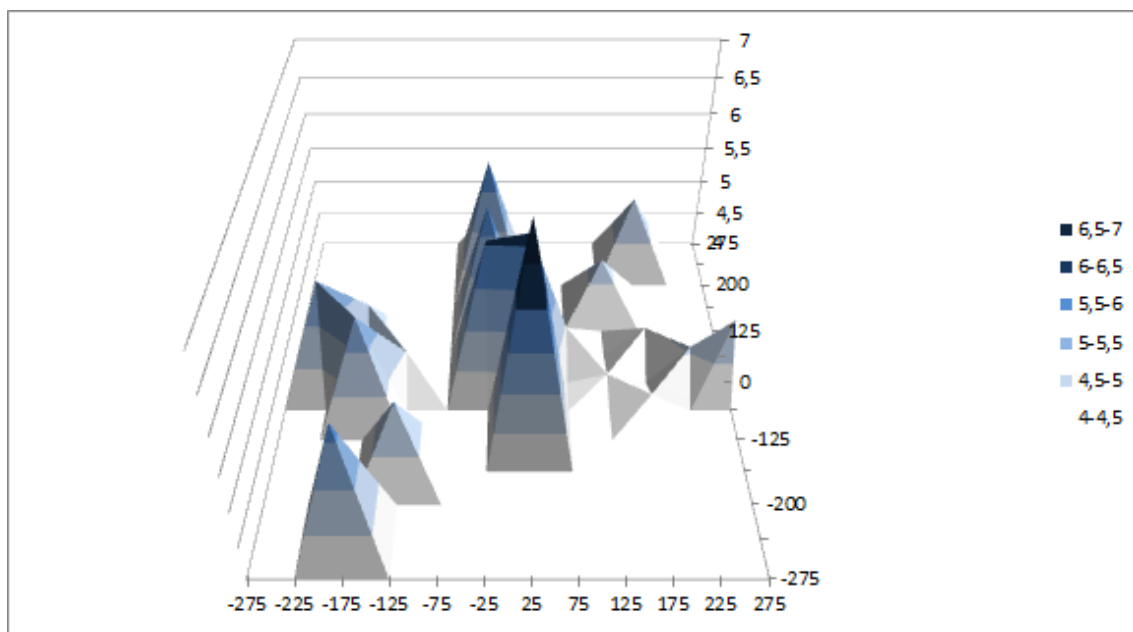


Figura 153: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 50 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

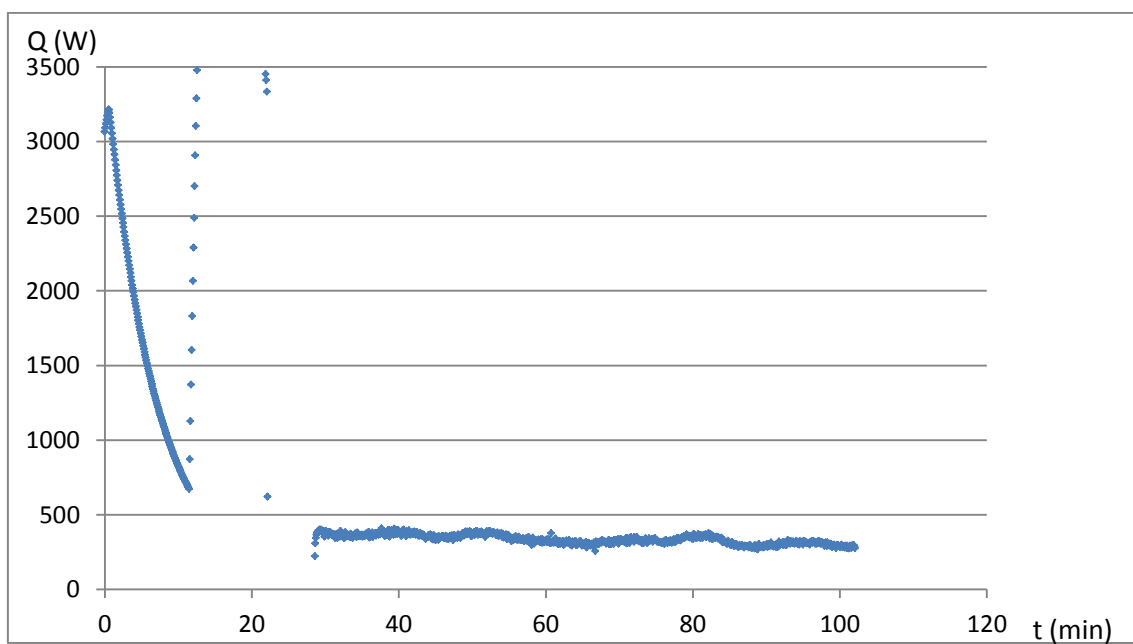


Figura 154: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 50 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

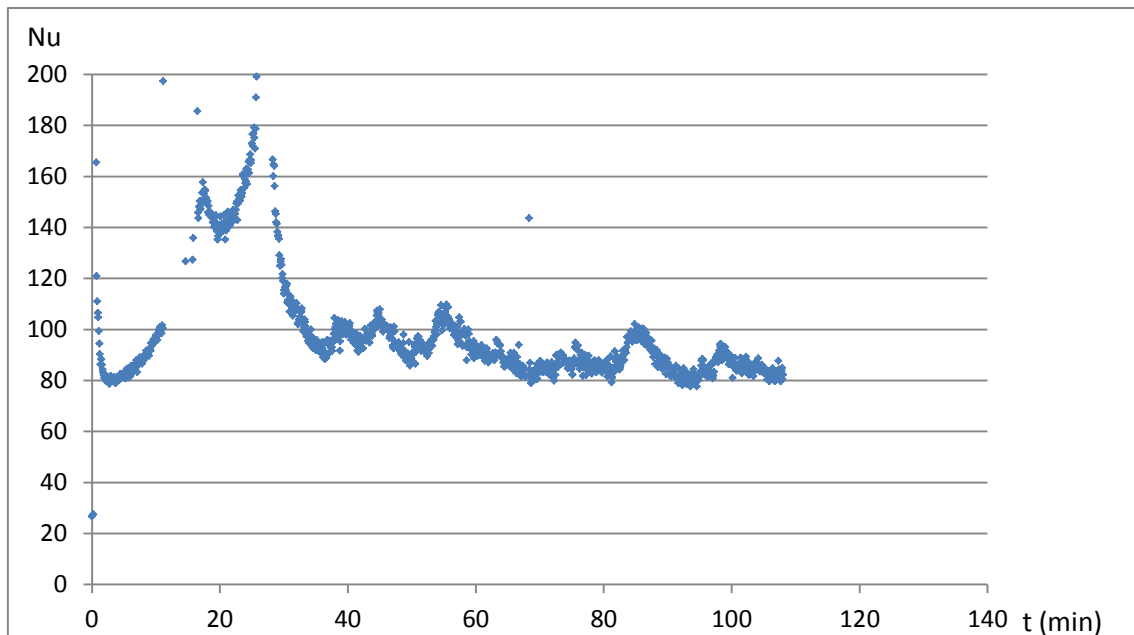


Figura 155: Número de Nusselt a 50 rpm, una concentración de 29.6 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

En este ensayo, el hielo comienza a aparecer a los 28 minutos, presentándose un pico por el proceso de subenfriamiento. Los valores que se alcanzan son de 5000 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 144 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 28 minutos es de 90 para el número de Nusselt y 2375 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 3214 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
28	144	90	5000	2375	3214

### 9.11. Ensayo 3A

El parámetro que se varia este ensayo, y en los sucesivos, es la concentración. La concentración impuesta es de 49.40 g/l. Se mantiene el salto de temperatura de 2.5 <sup>0</sup>C. Las gráficas obtenidas son:

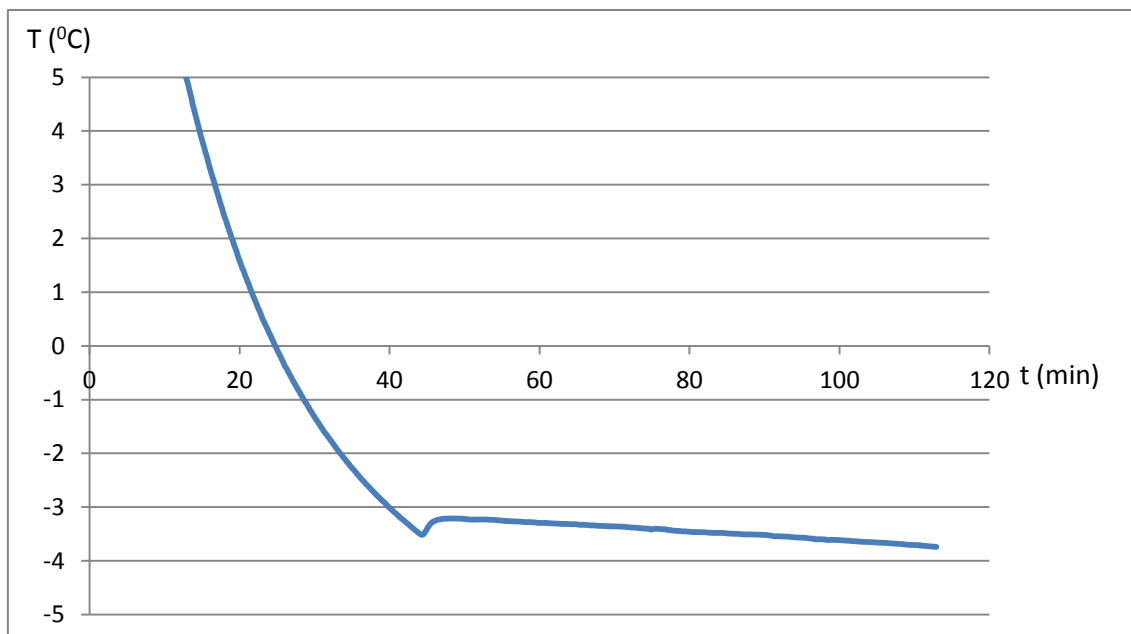


Figura 156: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro cálcico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 5 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

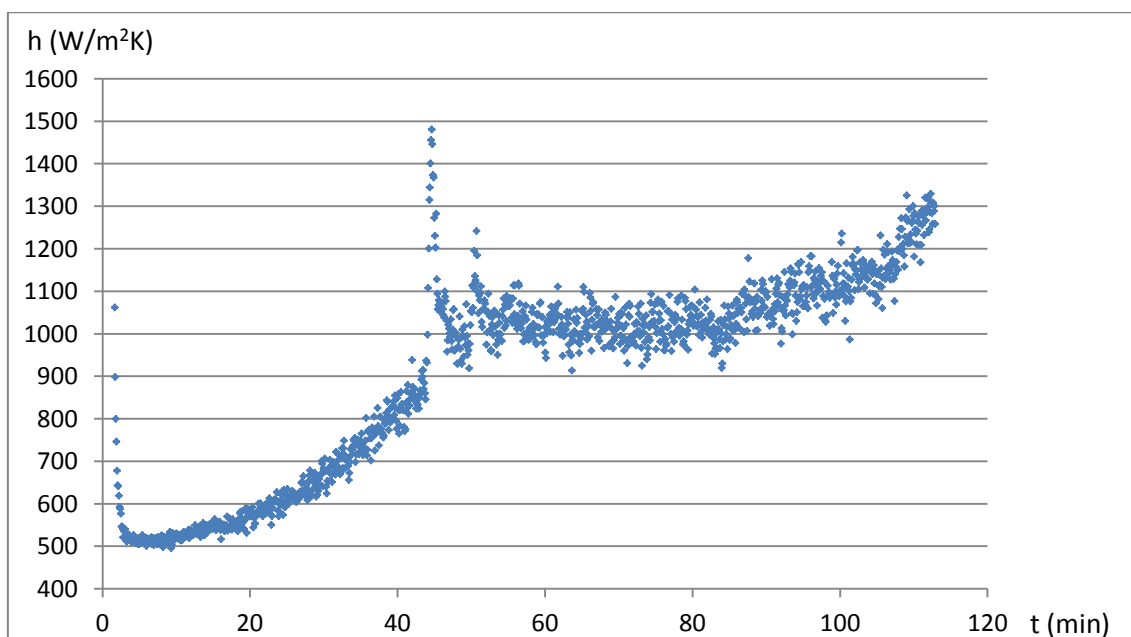


Figura 157: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 5 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

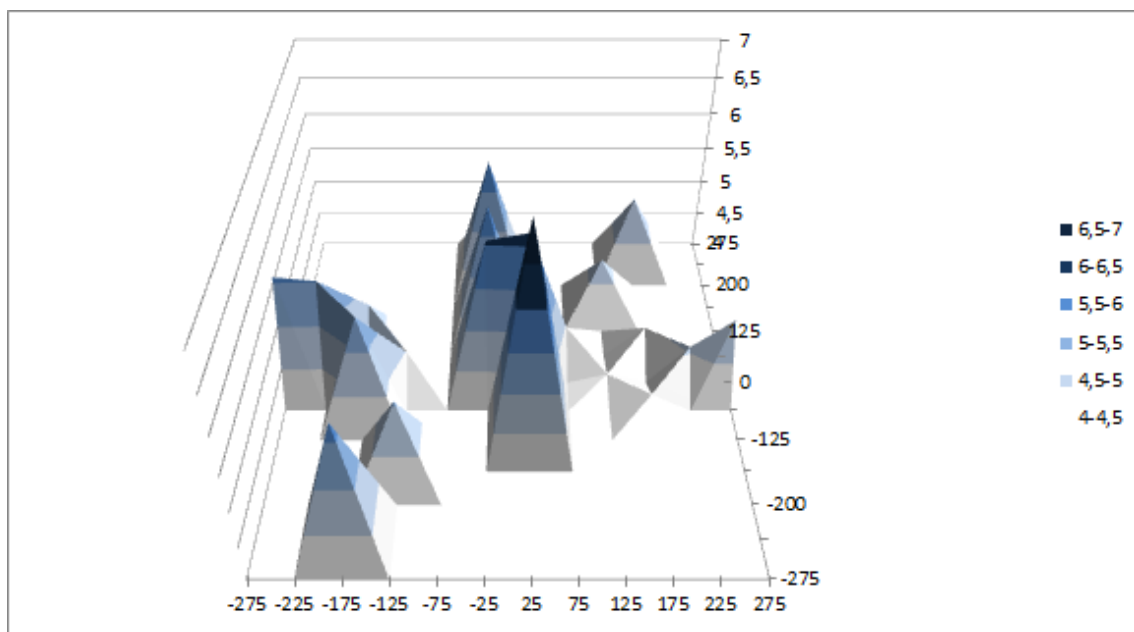


Figura 158: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 5 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

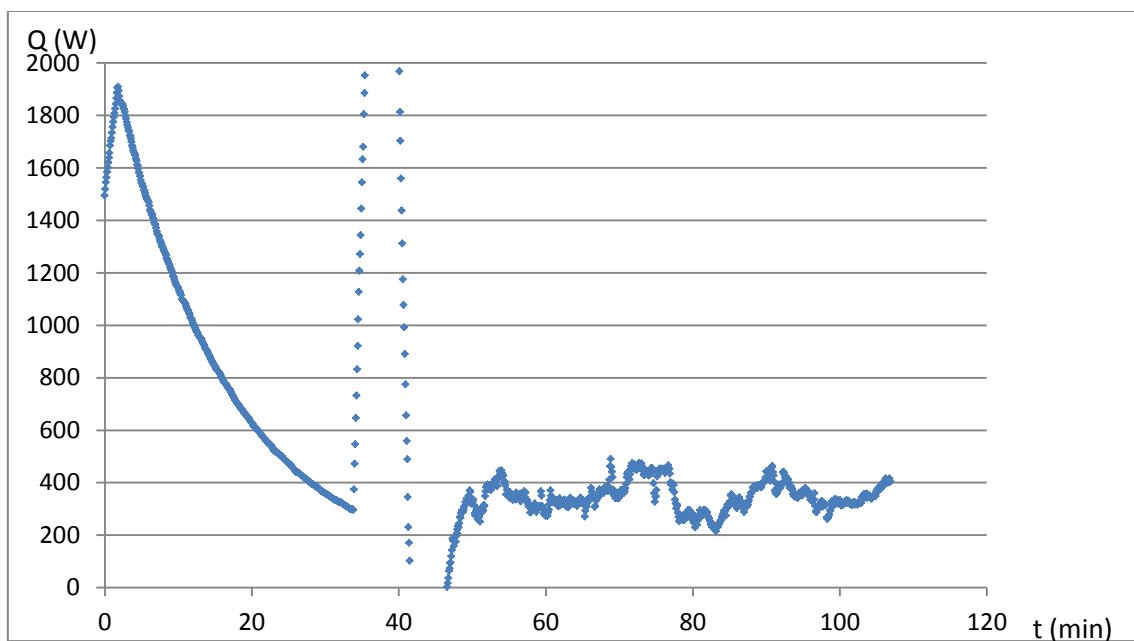


Figura 159: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 5 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

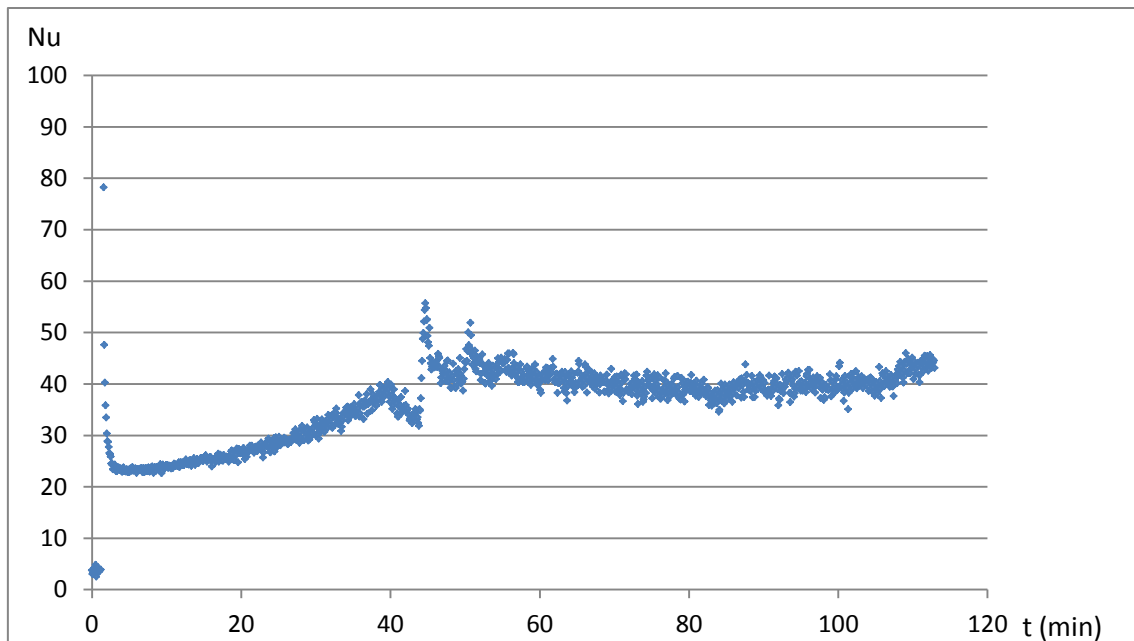


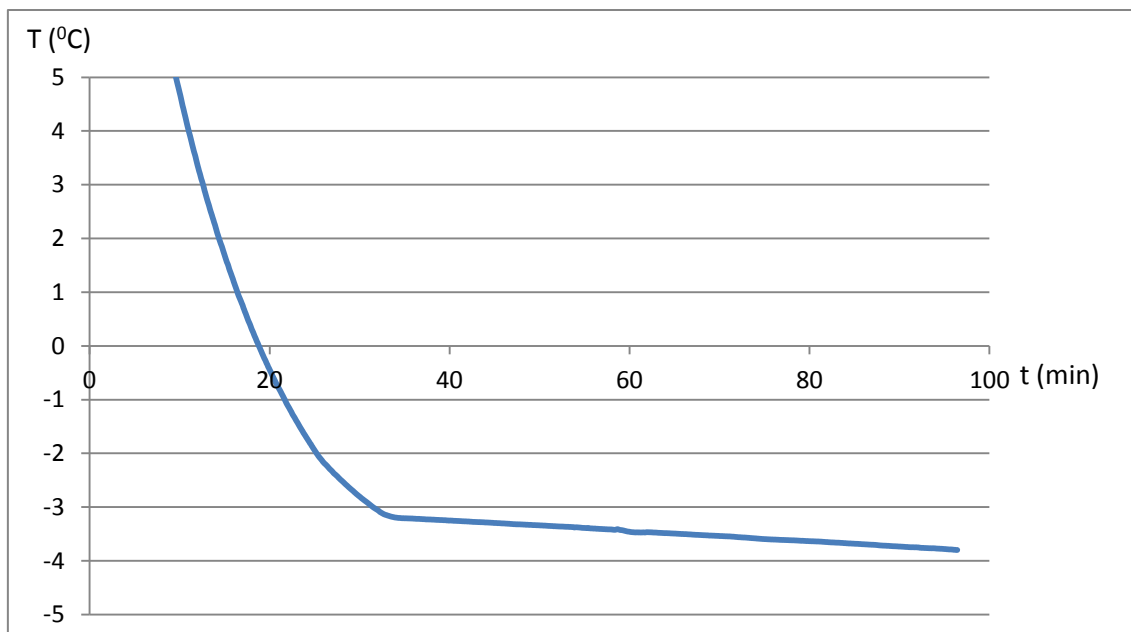
Figura 160: Número de Nusselt a 5 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

El hielo comienza a aparecer a los 45 minutos. Por las condiciones que se presentan se produce un pico por el proceso de subenfriamiento. Los valores que se alcanzan son de 1481 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 34 para el número de Nusselt. El valor medio para un tiempo mayor de 45 minutos es de 24 para el número de Nusselt y 1002 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 1873 W.

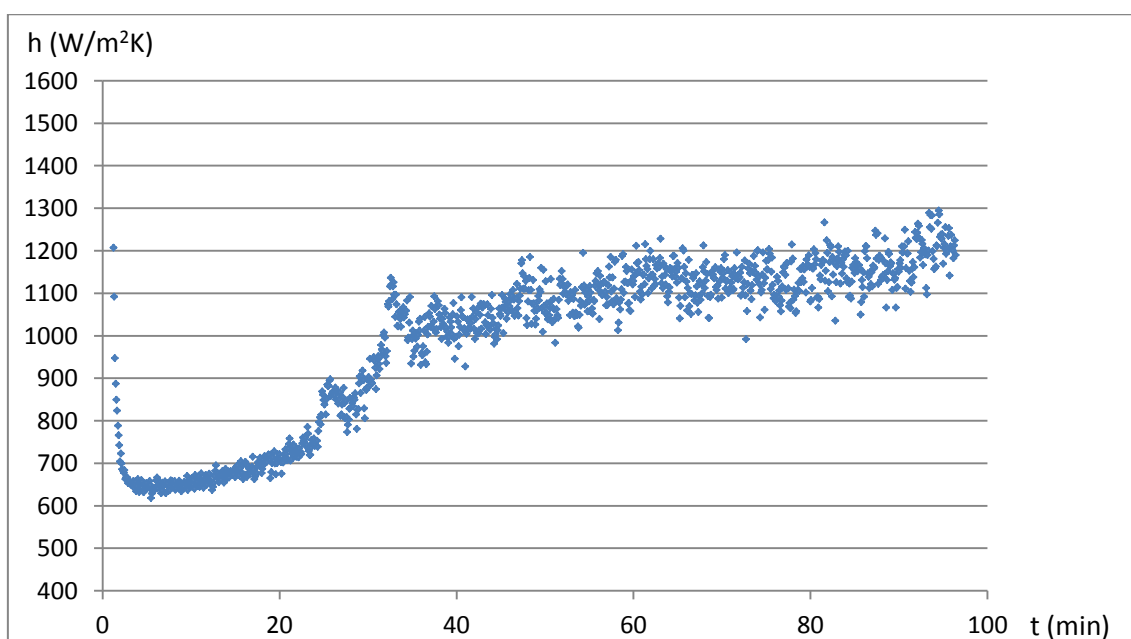
t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
45	34	24	1481	1002	1873

## 9.12. Ensayo 3B

El régimen de giro impuesto ahora es mayor, de 10 revoluciones por minuto. De igual manera, las gráficas obtenidas son:



*Figura 16J1: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 10 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C*



*Figura 162: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 10 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C*

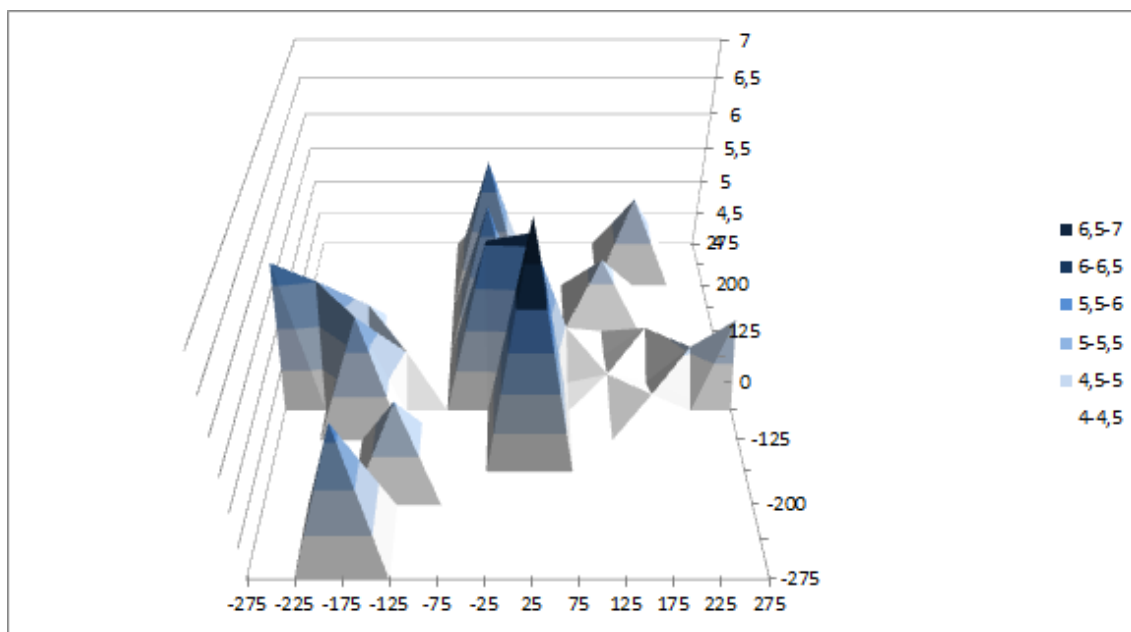


Figura 163: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 10 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

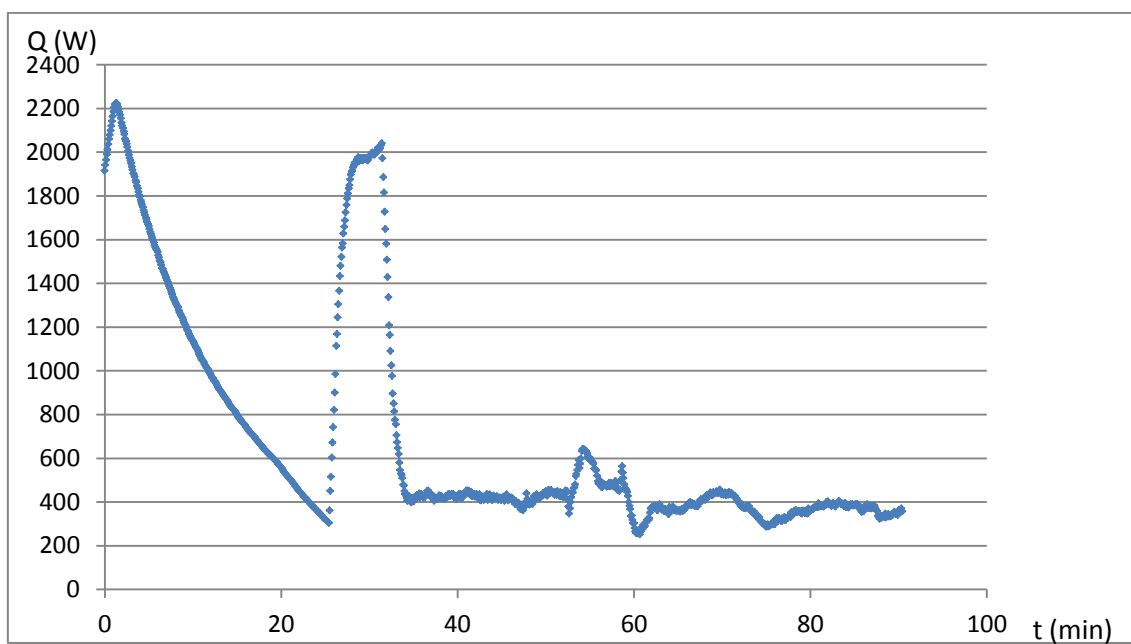


Figura 164: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 10 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

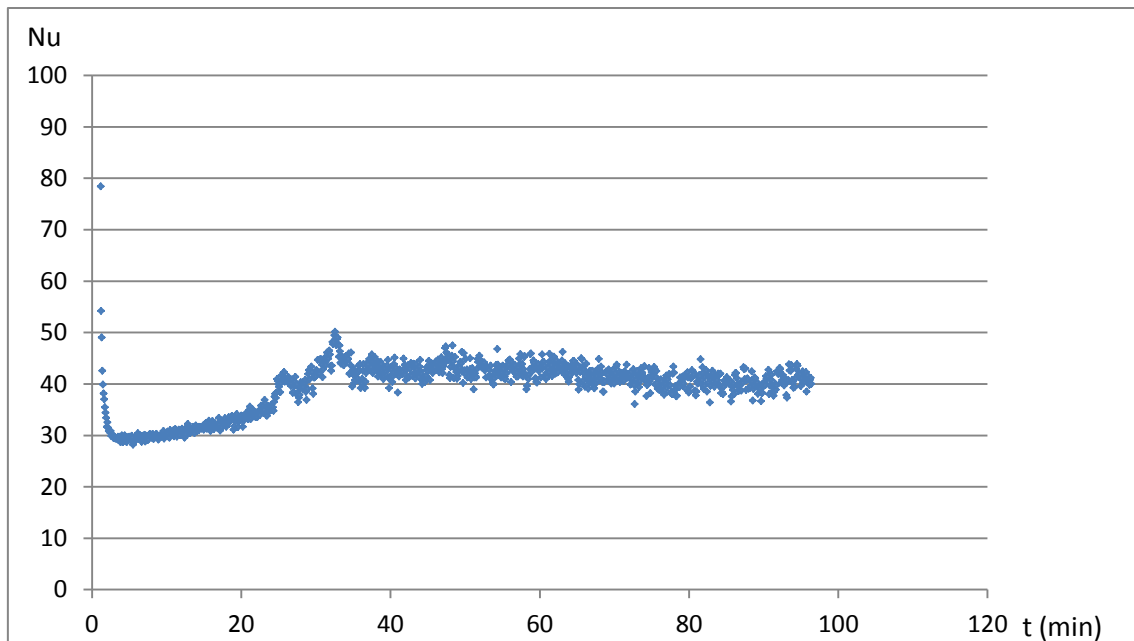


Figura 165: Número de Nusselt a 10 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

La aparición de hielo comienza a los 35 minutos. Los valores que se alcanzan son de 1185 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 37 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 35 minutos es de 25 para el número de Nusselt y 1070 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 2183 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
35	37	25	1185	1070	2183

### 9.13. Ensayo 3C

Las revoluciones a las que se hace girar el sistema de raspado son 15 revoluciones por minuto. Las gráficas obtenidas son:



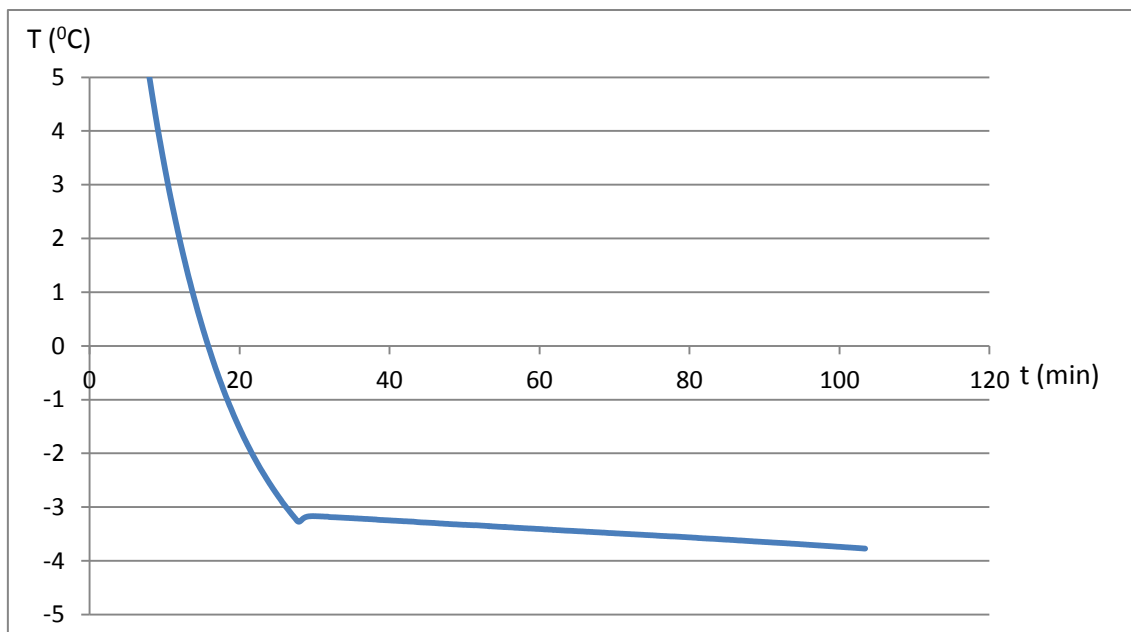


Figura 166: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro cálcico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 15 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

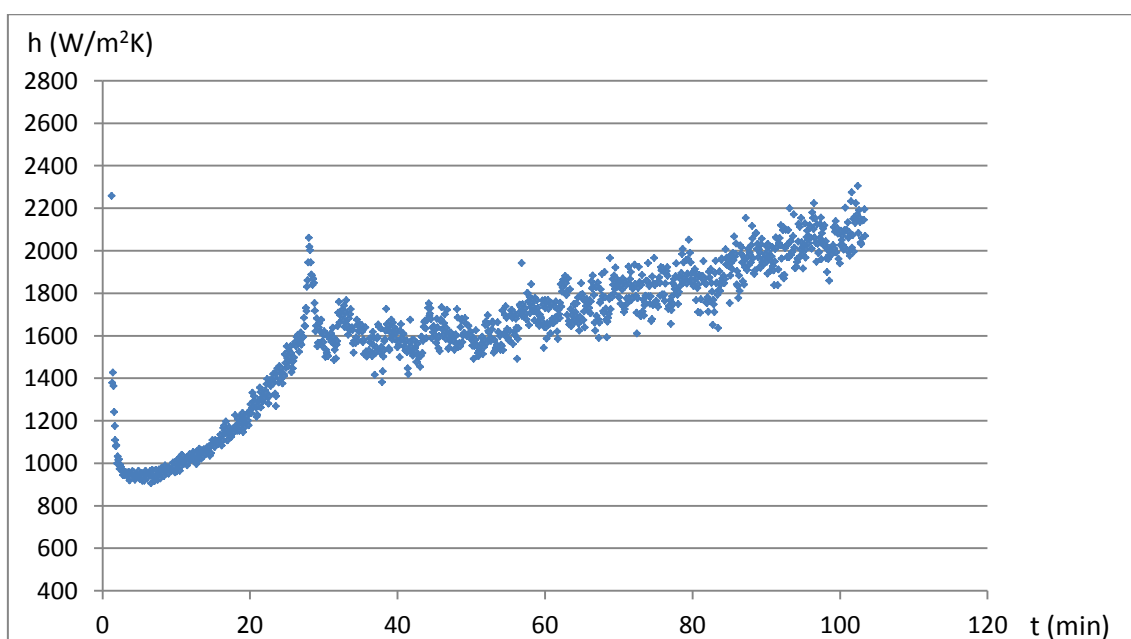


Figura 167: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 15 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$

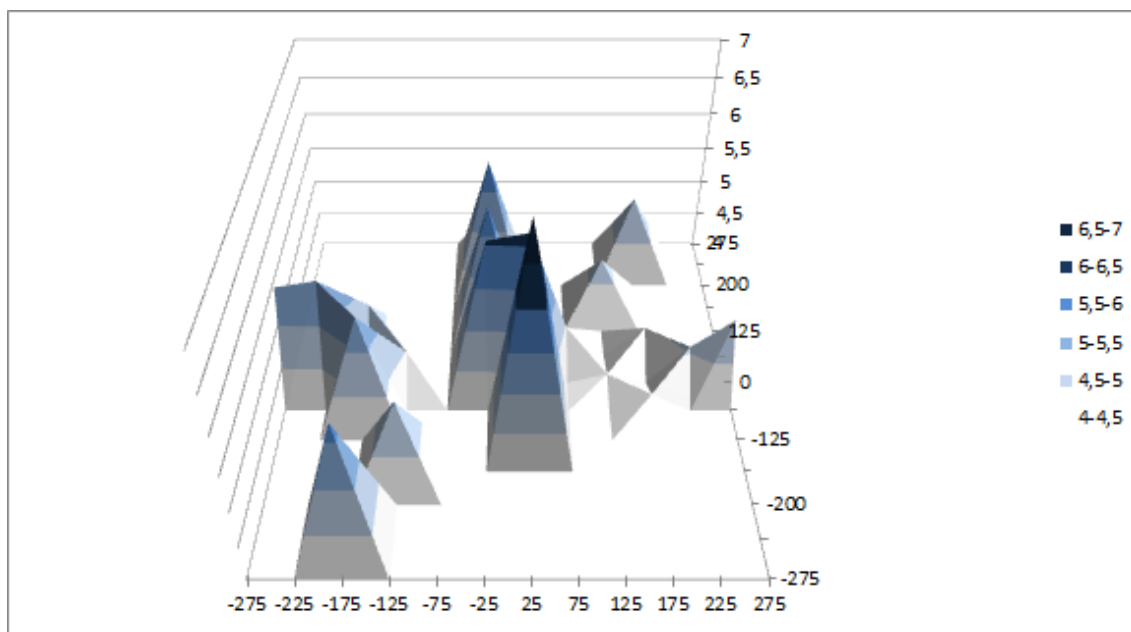


Figura 168: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 15 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

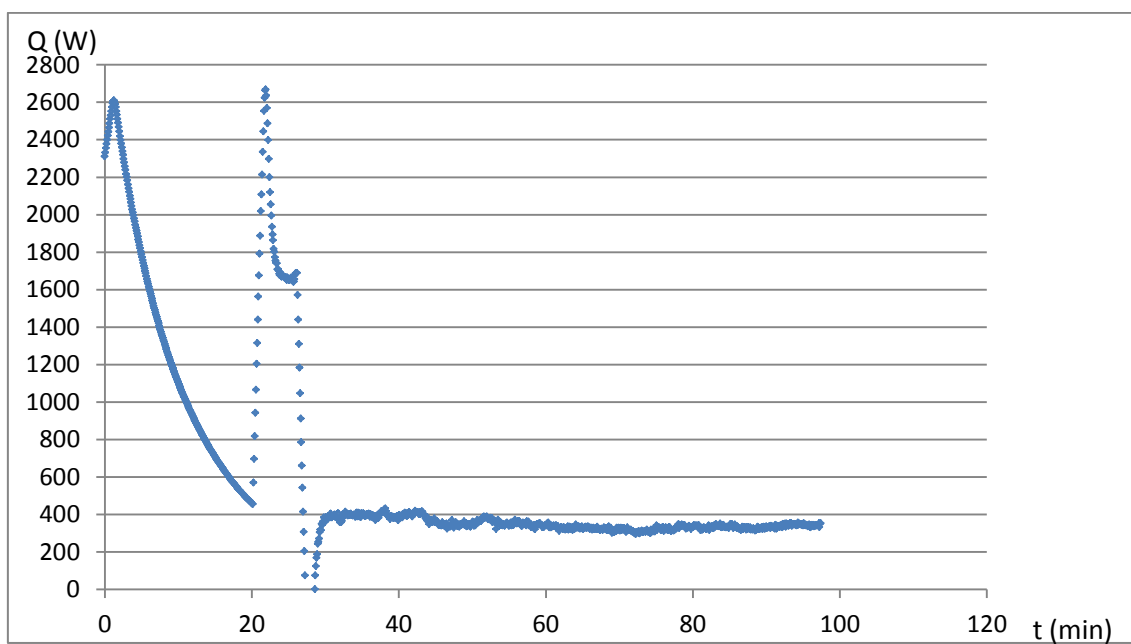


Figura 169: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 15 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

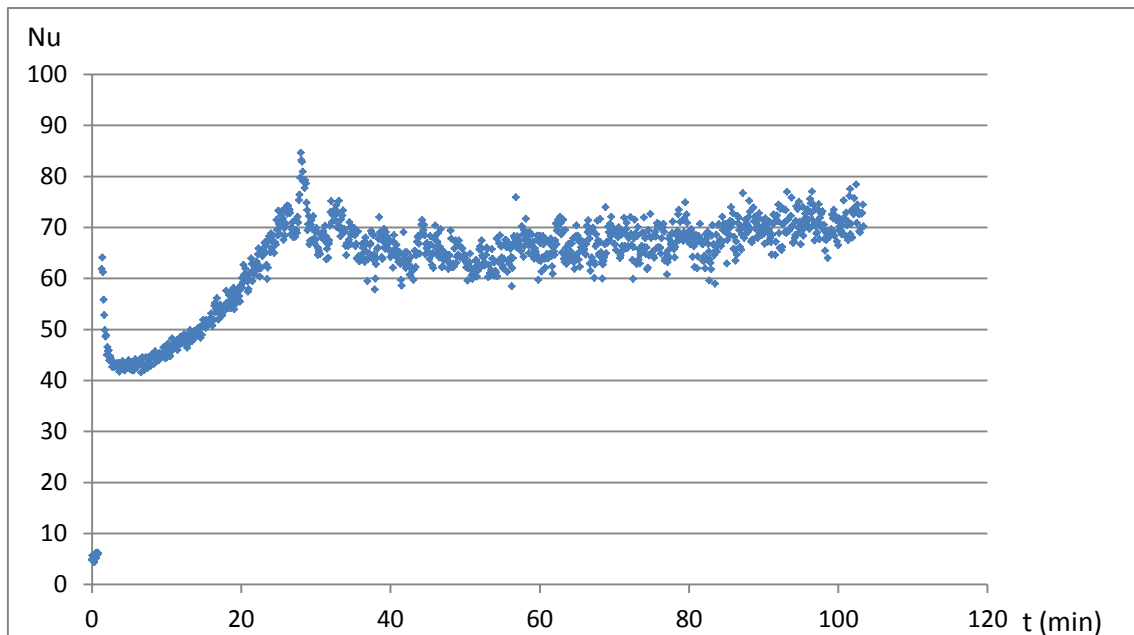


Figura 170: Número de Nusselt a 15 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>o</sup>C

En este ensayo, el hielo hace aparición a los 27 minutos, observándose un pico por el proceso de subenfriamiento. Los valores que se alcanzan son de 2060 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 50 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 27 minutos es de 40 para el número de Nusselt y 1663 W/m<sup>2</sup>K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 2560 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
27	63	40	2060	1663	2560

### 9.14. Ensayo 3D

Las revoluciones impuestas para este ensayo son ahora de 30 revoluciones por minuto, y las representaciones gráficas las siguientes:

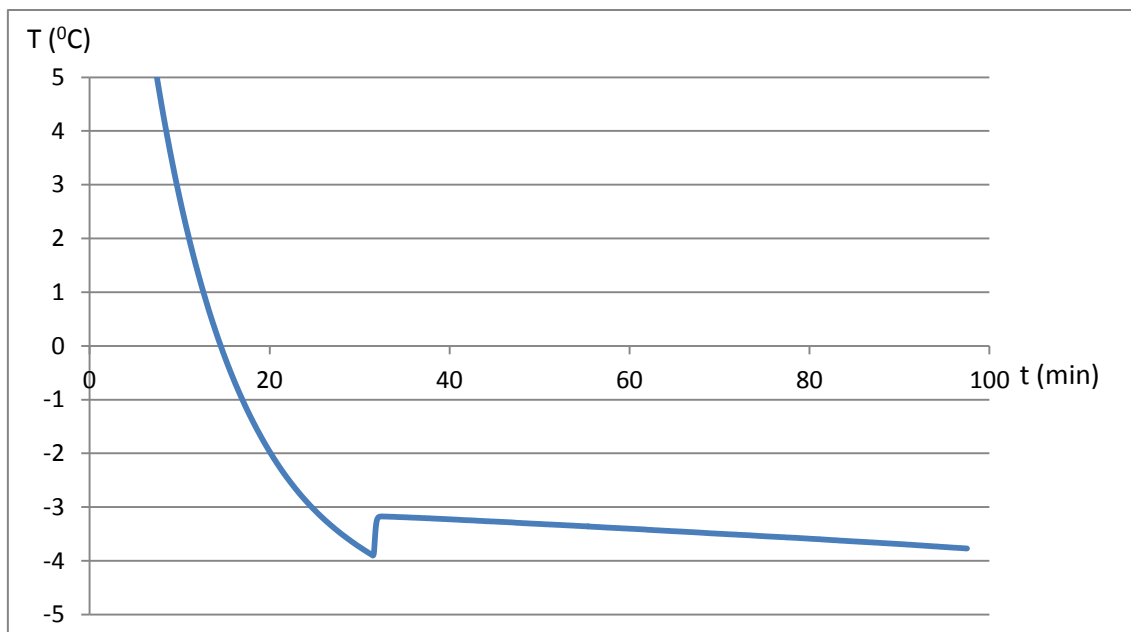


Figura 171: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 30 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

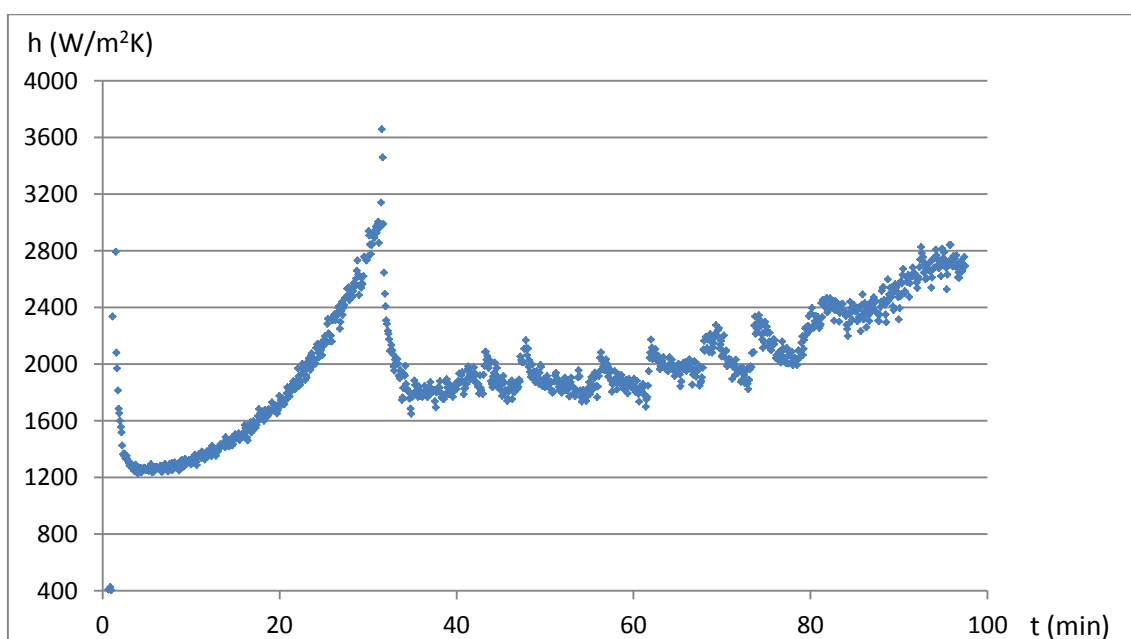


Figura 172: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 30 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

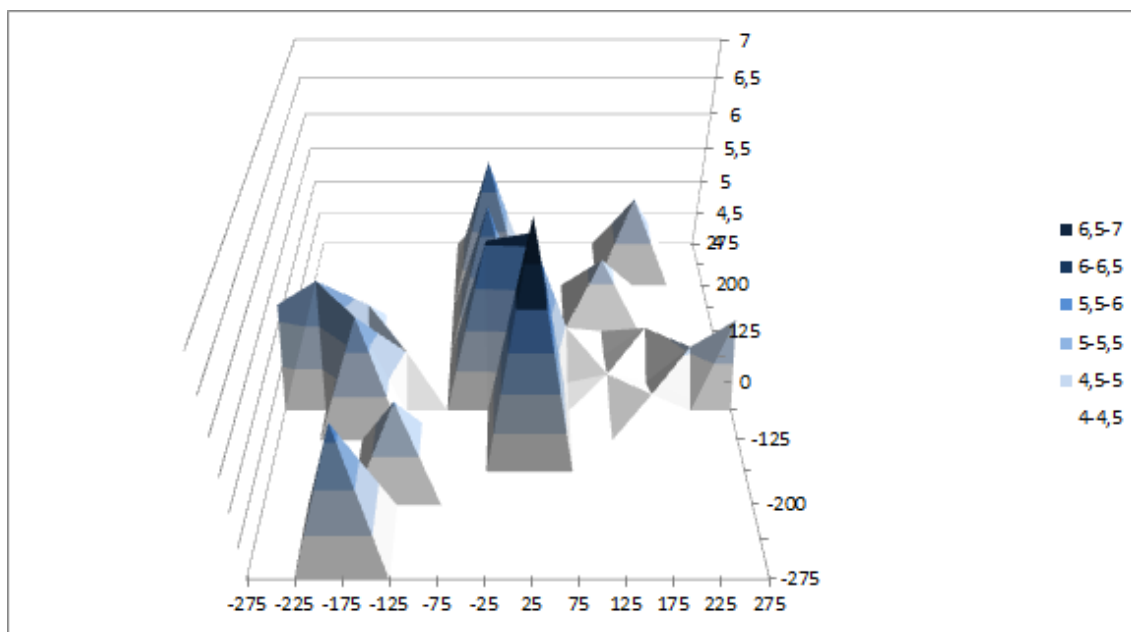


Figura 173: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 30 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

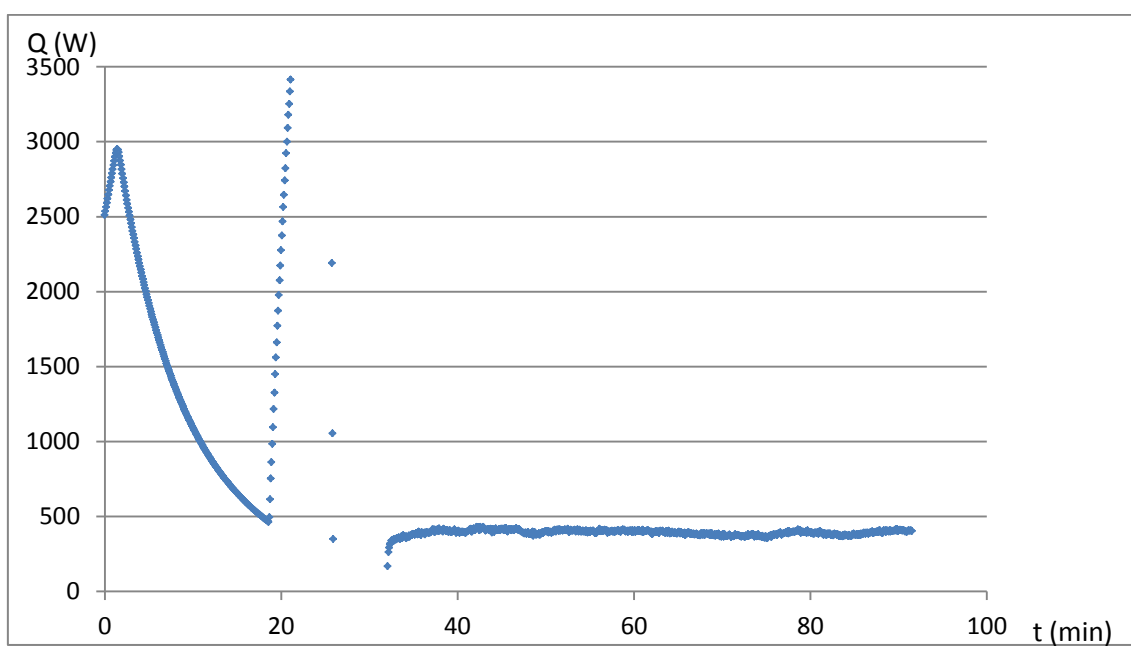


Figura 174: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 30 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>0</sup>C

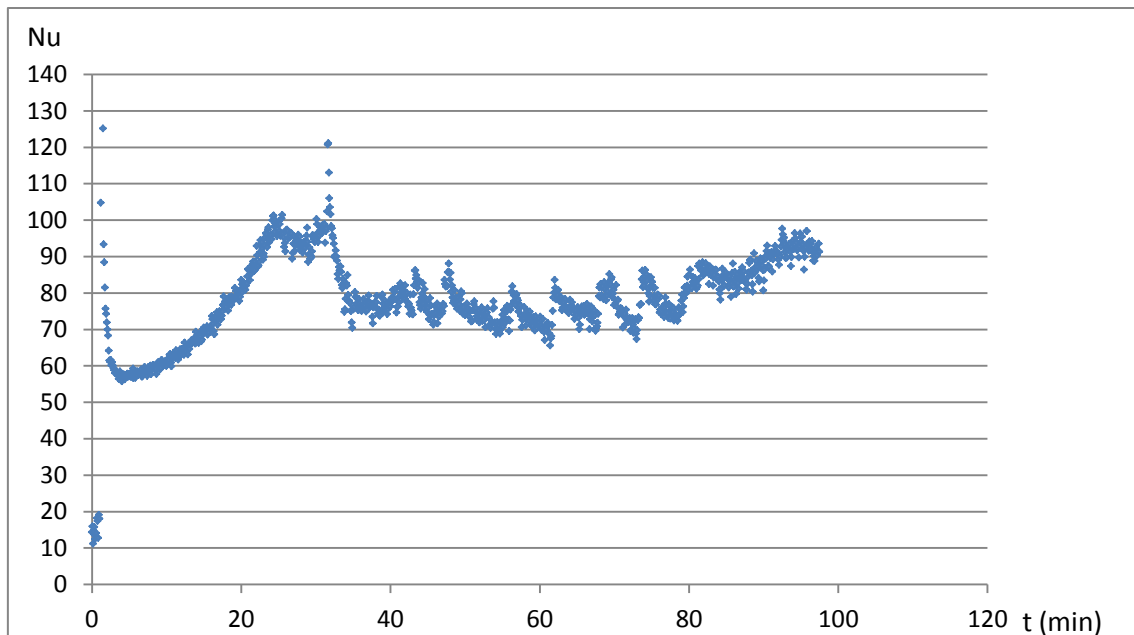


Figura 175: Número de Nusselt a 30 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5<sup>o</sup>C

El hielo aparece en este ensayo a los 26 minutos, dándose un pico por el proceso de subenfriamiento. Los valores que se alcanzan son de 3657 W/m<sup>2</sup>K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 81 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 26 minutos es de 47 para el número de Nusselt y 1955 W/K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 2896 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
26	81	47	3657	1955	2896

### 9.15. Ensayo 3E

Se toma como régimen de giro el último de estudio, el que corresponde a 50 rpm. Las gráficas obtenidas son:

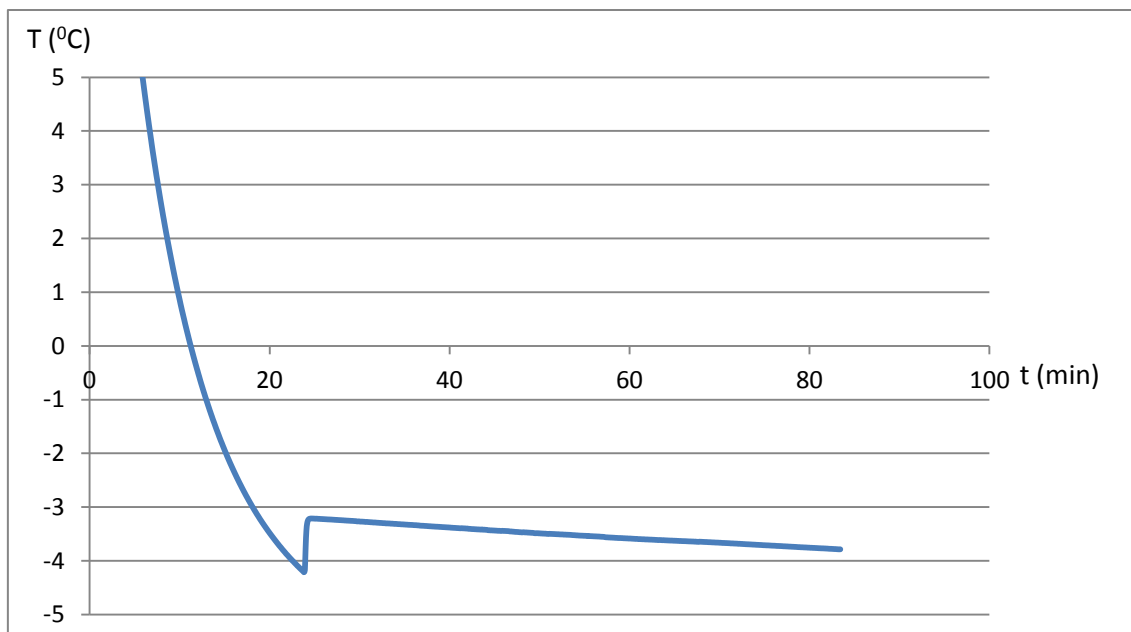


Figura 176: Representación gráfica de la evolución de la temperatura de la disolución de cloruro sódico a lo largo del tiempo de duración del ensayo a 50 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

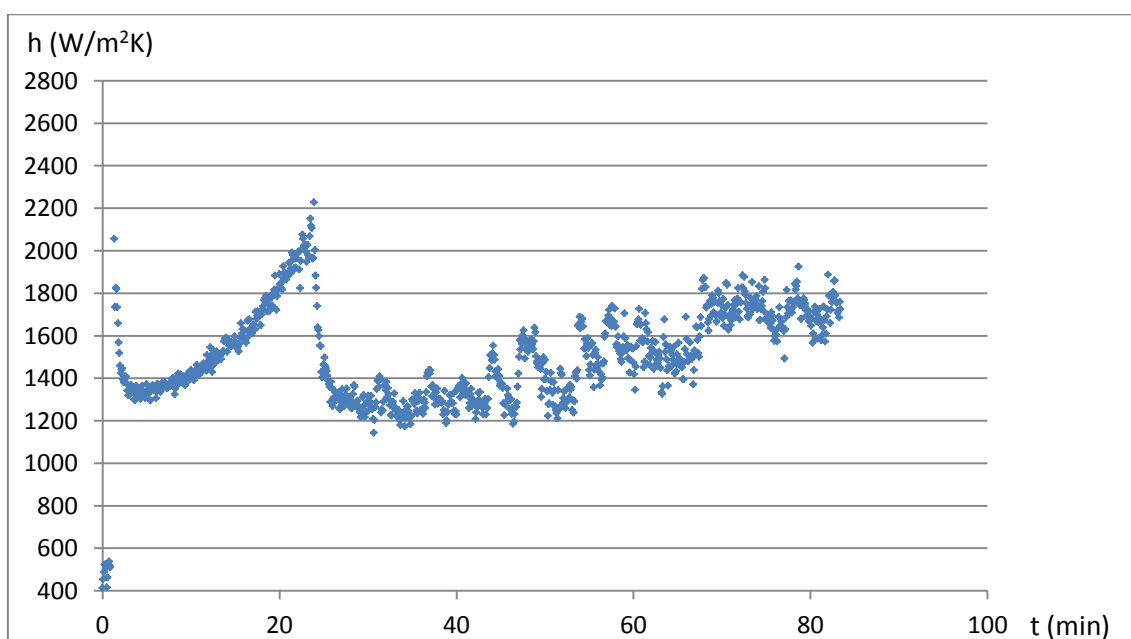


Figura 177: Representación gráfica de la evolución del coeficiente de transmisión de calor a 50 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

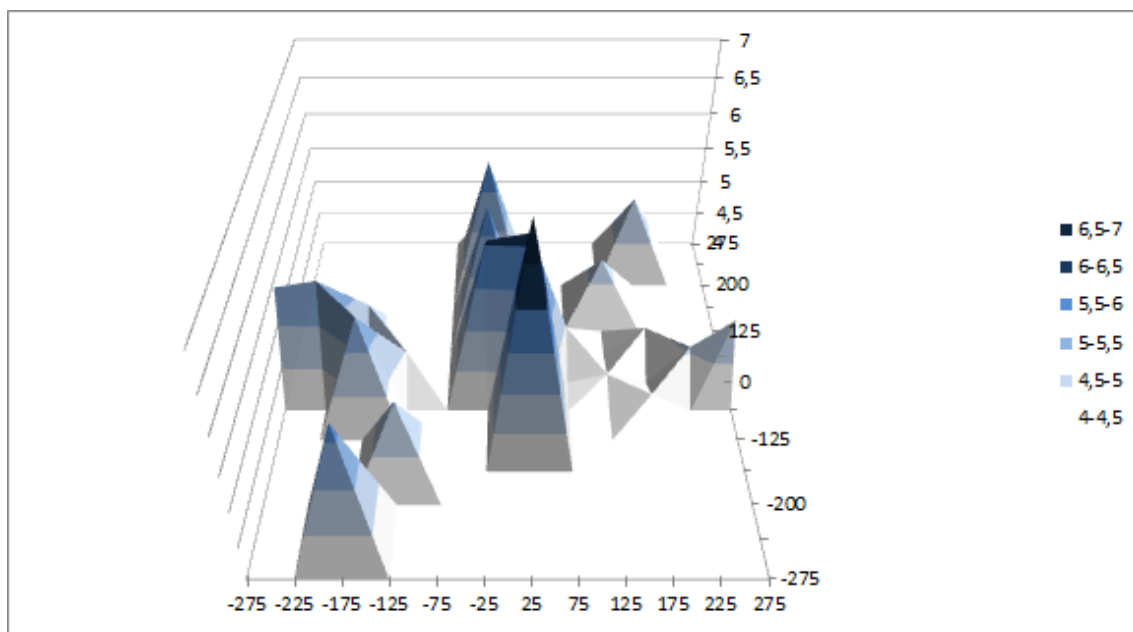


Figura 178: Distribución de la temperatura de la placa del intercambiador de calor a 50 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

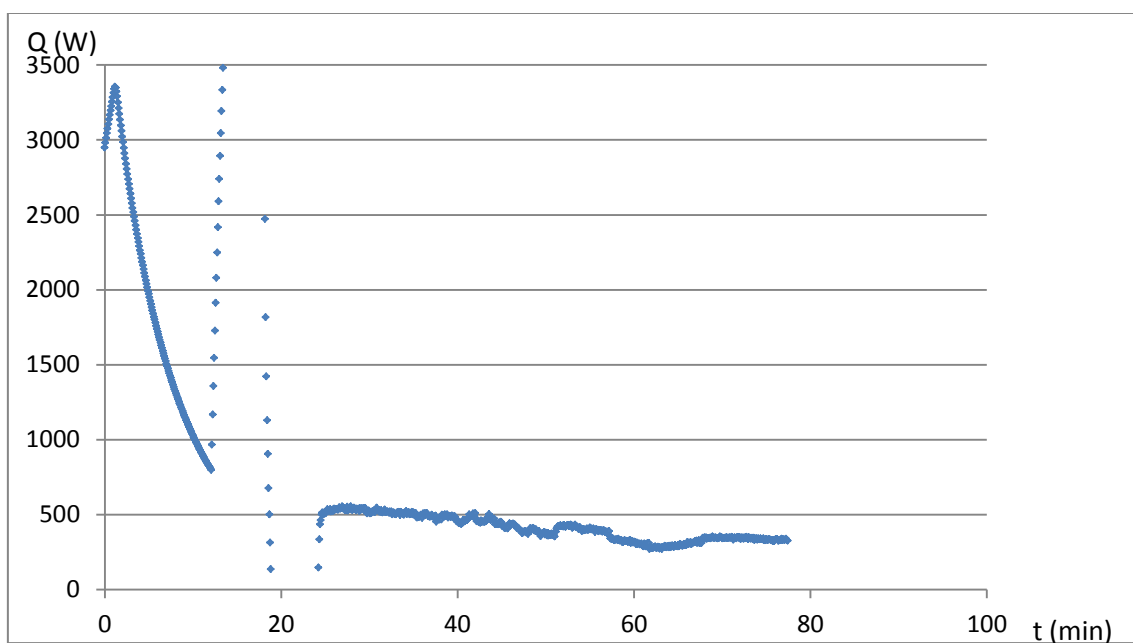


Figura 179: Potencia frigorífica obtenida en la instalación a 50 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C



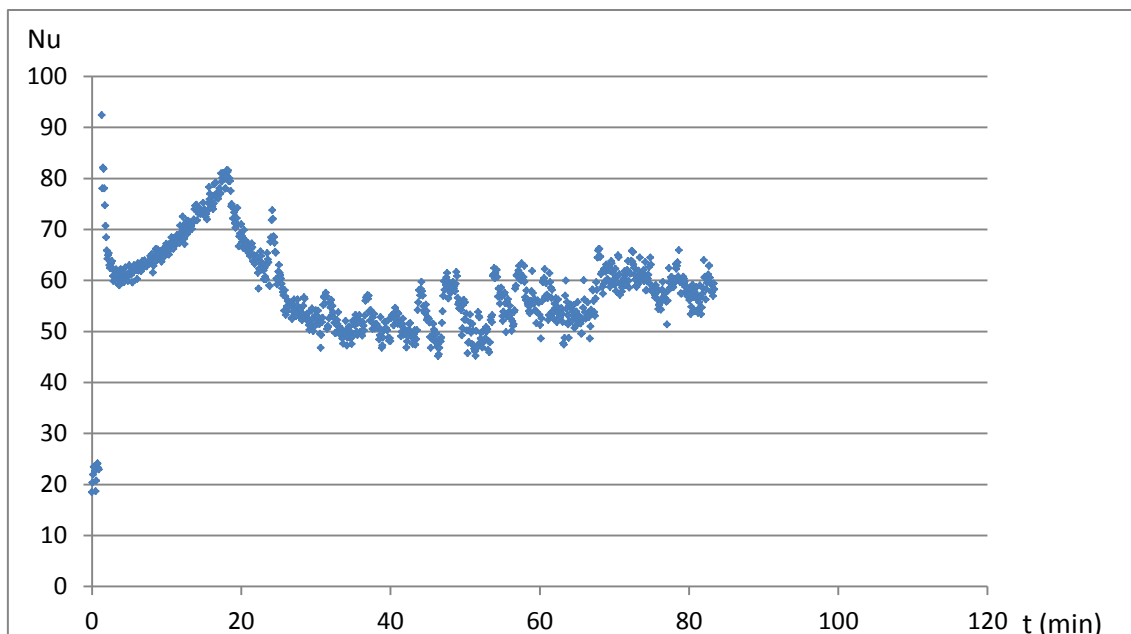


Figura 180: Número de Nusselt a 50 rpm, una concentración de 49.4 g/l y un salto de temperatura de 2.5°C

El hielo comienza a aparecer a los 25 minutos, generándose un pico por el proceso de subenfriamiento. Los valores que se alcanzan son de 2229 W/K de pico para el coeficiente de transmisión de calor y de 74 para el número de Nusselt. El valor para un tiempo mayor de 25 minutos es de 33 para el número de Nusselt y 1487 W/K para el coeficiente de transmisión de calor. La potencia frigorífica tiene un valor máximo de 3291 W.

t (min)	Nu		h (W/m <sup>2</sup> K)		Q (W)
	Max	Medio	Max	Medio	
25	74	33	2229	1487	3291